



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**JAAKKO POLVINEN**

**AJONEUVON OVEN RAKENTEEN KEHITTÄMINEN**

Diplomityö

Tarkastaja: Dos. Juha Miettinen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Automaatio-, kone- ja  
materiaalitekniikan  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
7. joulukuuta 2011.

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**POLVINEN, JAAKKO:** Ajoneuvon oven rakenteen kehittäminen

Diplomityö, 62 sivua

Tammikuu 2012

Pääaine: Konstruktitekniikka

Tarkastaja: Dos. Juha Miettinen

Avainsanat: alumiiniprofiili, FEM-laskenta, kolmipistetaivutuskoe, ovilehti, ovirakenne, polykarbonaatti

Diplomityön tilaajayritys tuottaa julkisen liikenteen ovijärjestelmiä. Ovissa käytettävää lasia on suunniteltu korvattavaksi polykarbonaatilla. Nykyisen oven alumiinirunko koostaan hitsaamalla alumiiniprofiilit toisiinsa kiinni. Alumiinin hitsaaminen ja hiominen vievät paljon aikaa ovien kokoonpanossa.

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää uudenlainen ovirakenne, jossa lasi on korvattu polykarbonaatilla ja hitsiliitokset on poistettu. Diplomityö tehtiin yhdessä materiaalitekniikan diplomityön kanssa, jossa tutkittiin tarkemmin polykarbonaatin kiinnittämistä oven runkoon. Työn alussa testattiin nykyisiä ovimalleja kolmipistetaivutuskokeen avulla. Tämän seurauksena saatiin määriteltyä raja-arvot, joiden avulla uusi ovi mitoitettiin. Testien jälkeen luotiin vaatimuslista uudelle ovelle, mikä pitää sisällään mekaaniset ja laadulliset vaatimukset. Uuden oven kehittämisessä käytettiin Pahlin ja Beitzin menetelmää, minkä perusteella saatiin kolme uudenlaista ovirakennetta. Ovirakenteita verrattiin nykyiseen oveen FEM-laskennan avulla. Yksi uusista ovimalleista valittiin jatkokehitykseen FEM-laskennan ja pistearvioinnin perusteella.

Diplomityön tuloksena kehitettiin uusi ovi, jossa alumiinirungon profiilit on varustettu ruuvitaskuin ja näin ollen hitsiliitokset saatiin korvattua ruuviliitoksien. Polykarbonaattilevyt kiinnitettiin toisiinsa käyttämällä levyjen välissä PVC-vaahtoa. Alumiiniprofiilit asennettiin polykarbonaattilevyjen väliin ja kiinnitettiin toisiinsa ruuviliitoksien. Lopputuloksena saatiin uudenlainen ovi, joka on kevyempi ja nopeampi koota kuin nykyinen ovi.

Ovirakenteiden käyttöolosuhteista johtuen oveen kohdistuu väsyttävää kuormitusta. Tästä johtuen ruuviliitoksen väsymiskestävyyttä tulee testata, jotta sitä voitaisiin verrata hitsiliitoksen väsymiskestävyyteen. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että alumiiniprofiilien liitokset suositellaan korvattavaksi ruuviliitoksien, kun ruuviliitoksen väsymiskestävyys saadaan paremmaksi kuin hitsiliitoksen.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**POLVINEN, JAAKKO:** Development of vehicle door design

Master of Science Thesis, 62 pages

January 2012

Major: Mechanics and design

Examiner: Docent Juha Miettinen

Keywords: aluminum profile, door design, finite element method, polycarbonate, three point test

Master thesis subscriber company provides solutions for public transport. The glass of the doors is designed to be replaced with polycarbonate. Aluminum frame of the door is made from aluminum profiles which are joined together with welding. Welding and refining of aluminum takes time during the assembly of the door.

The objective of this master's thesis was to design new kind of door structure, where glass has been replaced with polycarbonate and weld joints of the design has been replaced. This master's thesis was made in co-operation with material technology master's thesis, where polycarbonate joining methods were researched more specifically. In the beginning current door models were tested with three point test method. The test gave boundaries and limits for the new door design. After the test a requirement list was created for the door which includes mechanical and quality requirements. Pahl and Beitz method was used in the design where three different kind of design for new door were created. New door designs were compared to the current door with finite element method. One of the doors was chosen to further design with finite element method and point evaluation.

As a result of this master's thesis new door was designed where aluminum profiles are joined together with screw joint. Polycarbonate sheets are bonded together using PVC-foam in between of the sheets. New kind of aluminum profiles are assembled between the polycarbonate sheets and joined together with screw joint. As a result new door was designed, which is lighter and faster to assemble than current door.

Due to the conditions for usage, the door suffers fatigue loads. That is the reason why screw joint fatigue resistance need to be tested, that it would be comparable to weld joint. As conclusion aluminum profile joining is recommended to be replaced by screw joints, until screw joint fatigue resistance is better than weld joint.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitokselle. Diplomityö tehtiin yhteistyöyrityksen kanssa, joka tilasi työn konstruktitekniikan laitokselta. Tarkoituksena oli löytää mahdollisimman paljon hyötyjä ovirakenteessa olevan lasin korvaamisesta polykarbonaatilla.

Haluan kiittää materiaalitekniikan diplomityöntekijää Mikko Salosta. Kiitos kuuluu myös tilaajayrityksen työntekijöille, jotka mahdollistivat tämän työn läpiviemisen. Lisäksi haluan kiittää työni tarkastajaa dosentti Juha Miettistä, jolta sain arvokkaita neuvoja koskien diplomityötäni.

Erityisen suuri kiitos kuuluu vanhemmilleni Kajaaniin, joiden tuen avulla olen voinut suorittaa opintoni loppuun saakka. Viimeisenä haluan kiittää ystäviäni sekä tyttöystävääni Jenniä, jonka kannustuksen avulla olen saanut erityisen paljon motivaatiota diplomityöni tekemiseen.

Tampereella 25.1.2012

---

Jaakko Polvinen  
Insinöörinkatu 60 C 210  
33720 Tampere  
050 520 2442



## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	II
ABSTRACT .....	III
ALKUSANAT.....	IV
TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT .....	VII
1. JOHDANTO .....	1
2. OVIRAKENTEIDEN TEOREETTINEN TARKASTELU .....	3
2.1 Lujuusopin peruskäsitteitä.....	3
2.1.1 Jännityksen ja venymän välinen yhteys .....	5
2.1.2 Vinon leikkauksen jännitykset.....	6
2.1.3 Suoran palkin taivutus.....	8
2.2 Väsyminen.....	10
3. TUTKITTAVAT OVIRAKENTEET .....	11
3.1 Ulospäin kääntyvät ovirakenteet.....	11
3.2 Sisäänpäin kääntyvä ovirakenne .....	13
4. NYKYISTEN OVIRAKENTEIDEN KOKEELLINEN ANALYSOINTI ...	14
4.1 Tutkimuslaitteiston esittely.....	14
4.2 Kolmipistetaivutuskoe.....	17
4.3 Nykyisten ovirakenteiden mittaustulokset .....	20
5. OVIRAKENTEEN KEHITTELY .....	22
5.1 Vaatimuslista .....	22
5.2 Abstrahointi .....	23
5.3 Toimintorakenteen laatiminen .....	24
5.4 Morfologinen matriisi .....	25
5.5 Profiilivaihtoehdot .....	26
5.5.1 Profiilin mitoittaminen .....	27
5.6 Profiilien kiinnittäminen toisiinsa.....	28
5.7 Polykarbonaatin kiinnittäminen oven runkoon.....	30
5.8 Toimilaitteiden kiinnittäminen .....	32
5.9 Ratkaisumuunnelmien pistearviointi.....	32
6. OVIRAKENNEVAIHTOEHTOJA .....	36
6.1 Alumiininen U-profiili .....	37
6.2 Teräksinen U-profiili.....	39
6.3 Alumiininen suorakaideprofiili ruuvitaskuilla.....	41
7. OVIRAKENTEIDEN VERTAILU.....	44
7.1 Jatkokehitykseen valitun oven analysointi .....	44
7.2 Uusien ovirakenteiden analysointi .....	47
7.3 Ovien rakenteiden vertaaminen .....	49

8.	EHDOTUS UUDEKSI OVIRAKENTEEKSI.....	51
8.1	Prototyyppiovi .....	56
9.	YHTEENVETO .....	59
	LÄHTEET.....	61

# TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

$A$	pinta-ala
$A_\alpha$	pinta-ala vinossa leikkauksessa
$E$	kimmomoduuli
$F$	voima
$I$	palkin neliömomentti
$I_z$	neliömomentti z-akselin suhteen
$L$	alkuperäinen pituus
$\hat{L}$	pituuden muutos
$L_{ovi}$	ovilehden pituus
$M_t$	taivutusmomentti
$N$	normaalivoima
$N_\alpha$	normaalivoima vinossa leikkauksessa
$Q_\alpha$	leikkausvoima vinossa leikkauksessa
$R_e$	myötöraja
$R_m$	murtoraja
$W_1$	taivutusvastus
$W_2$	taivutusvastus
$a_1$	reunaetäisyys
$a_2$	reunaetäisyys
$b_{ovi}$	ovilehden leveys
$b_{prof}$	ovilehden runkoprofiilin leveys
$h$	ovilehden paksuus
$k$	venymäliuska
$t$	profiilin seinämävahvuus
$v$	taipuma
$v''$	kimmoviivan differentiaaliyhtälö
$v_{FEM}$	FEM-laskennalla saatu taipuma
$v_{max}$	rungon suurin taipuma
$x$	muuttuja x-akselilla
$y$	muuttuja y-akselilla
$\Delta L$	pituuden muutos
$\alpha$	leikkauskulma
$\varepsilon$	venymä
$\sigma$	normaalijännitys

$\sigma_p$	suhteellisuusraja
$\sigma_{r1}$	reunajännitys
$\sigma_{r2}$	reunajännitys
$\sigma_t$	taivutusjännitys
$\sigma_\alpha$	normaalijännitys vinossa leikkauksessa
$\tau_\alpha$	leikkausvoima vinossa leikkauksessa
$v_{FEM}$	FEM-laskennalla saatu taipuman arvo
FEM	Finite element method (Elementtimenetelmä)
PC	Polykarbonaatti
PVC	Polyvinyylikloridi

# 1. JOHDANTO

Diplomityön tilaajayritys suunnittelee, rakentaa ja tuottaa julkisen liikenteen käyttöön tarkoitettuja ovijärjestelmiä, ovia ja ovien komponentteja. Ovien koon kasvaessa niissä käytetty lasi tekee ovista raskaan ja antaa ovien käyttökoneistoille lisää vaatimuksia. Tästä johtuen ovissa käytettyä lasia on suunniteltu korvattavaksi polykarbonaatilla, jonka avulla ovien painoa on mahdollista pienentää huomattavasti. Näin ollen liikennöitsijällä on mahdollisuus pienentää kuljetuskustannuksia alentamalla ajoneuvon painoa. Nykyiset alumiinirungot valmistetaan hitsaamalla alumiiniprofiilit toisiinsa kiinni. Alumiinin hitsaaminen ja hiominen vievät paljon aikaa ovien kokoonpanossa. Tuotannon läpimenoajan lyhentymisen nostaisi ovien toimittamisen luotettavuutta. Siksi on tärkeää, että hitsiliitokset saataisiin poistettua ja korvattua jollain muulla tavalla.

Tämän diplomityön tavoitteena on kehittää uudentyyppinen ovirakenne, jossa lasi on korvattu polykarbonaatilla. Polykarbonaatti on hyvin lasinkaltainen polymeeri, mutta huomattavasti kevyempi kuin lasi. Diplomityön tavoitteena on lisäksi poistaa alumiinirungon hitsiliitokset ja löytää korvaava tapa profiilien kiinnittämiseen. Uuden oven tulee olla yhtä jäykkä kuin nykyiset ovimallit, mutta kevyempi. Diplomityö tehdään yhteistyössä materiaalitekniikan diplomityön kanssa, jolloin aiheeseen saadaan niin koneellinen kuin materiaaliopillinen lähestymistapa.

Tutkimustyön tavoitteena on myös löytää mahdollisimman paljon etuja lasin korvaamisesta polykarbonaatilla, kuten ovirakenteen keventyminen ja tuotannon läpimenoajan pienentyminen. Työssä ei oteta kantaa taloudellisiin seikkoihin, kuten tuotannon kustannuksiin tai tuotteen myyntihintoihin. Ovirakenteen keventyminen kuitenkin laskee liikennöitsijän kuljetuskustannuksia.

Diplomityön ensimmäisessä osassa testataan nykyisten ovilehtien jäykkyyttä ilman lasia ja lasin kanssa. Näistä nähdään mitä vaikutuksia lasi tuo oven jäykkyyteen. Työn toisessa osassa kehitellään uudenkaltaista ovirakennetta, jossa lasin korvaa polykarbonaatti. Kehittelyssä otetaan huomioon, miten erimuotoiset profiilit vaikuttavat ovilehden jäykkyyteen ja miten ne kiinnitetään toisiinsa. Ovilehden käyttövipujen ja toimilaitteiden kiinnittäminen otetaan myös huomioon kehittelyvaiheessa. Kehittelyn apuna käytetään myös 3D-mallinnusta ja FEM-laskentaa, joiden avulla voidaan verrata nykyistä ovea uusiin ovirakenteisiin.

Tarkoituksena ei ole suunnitella täysin uutta tuotetta vaan ottaa kantaa millaisia vaatimuksia oven rakenteeseen tulee, kun lasi korvataan polykarbonaatilla. Lisäksi tarkoituksena on kehittää mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja uudentyyppiselle ovirakenteelle. Tuloksissa esitellään profiilien kiinnitysten osalta erilaisia ratkaisuja, joiden avulla pyritään pääsemään eroon rakenteessa esiintyvistä hitsauksista. Hitsiliitosten poistaminen

on tärkeää, jotta tuotannon läpimenoaika olisi lyhyempi ja kokoonpanon ergonomia parempi. Diplomityö antaa tilaajayritykselle suuntaa siitä, onko ovissa käytetyn lasin korvaaminen polykarbonaatilla mahdollista vai vaatiiko se vielä lisää tutkimista. Diplomityön perusteella nähdään, onko polykarbonaatti hyvä vaihtoehto lasin korvaamiseen.

## 2. OVIRAKENTEIDEN TEOREETTINEN TARKASTELU

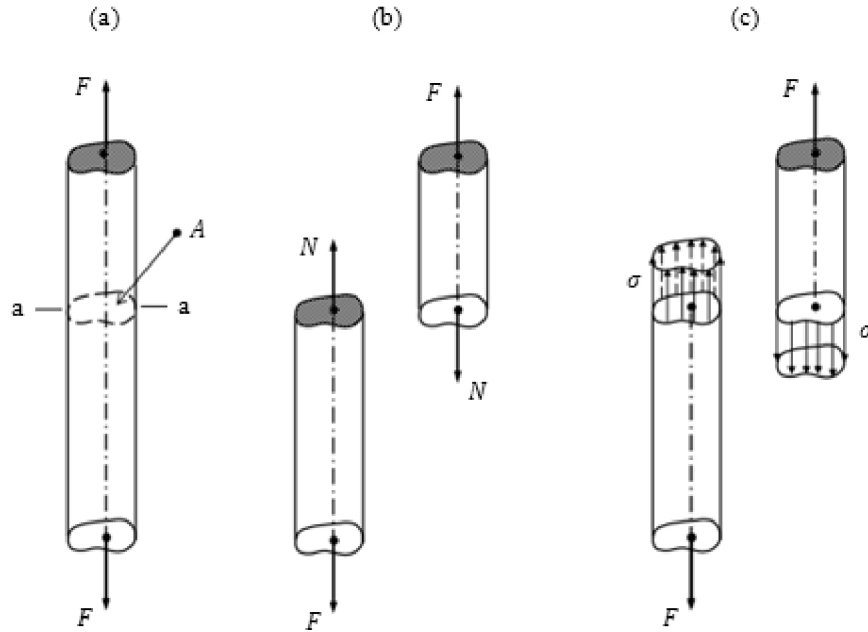
Tässä luvussa tarkastellaan ovirakenteiden kestävyyyteen vaikuttavia lujuusopillisia ominaisuuksia. Niihin vaikuttavat oleellisesti materiaalien lujuus- ja jäykkyysominaisuudet eli alumiinin ja lasin sekä näitä yhdistävän liiman ominaisuudet. Oven rakenteiden kestävyyyteen vaikuttavat myös materiaalien väsymisominaisuudet, koska oven käyttöympäristöstä johtuen ovi joutuu väsyttävän kuormituksen alaiseksi.

Tässä diplomityössä tutkitaan ovirakenteita lujuusopin näkökulmasta, kun rakenteisiin kohdistuu staattisia kuormituksia. Ovien staattista kestävyyttä tutkitaan ja mitoitetaan uusi ovi sallitun taipuman perusteella. Ovirakenteiden väsymistä ei tässä työssä tutkita, koska tilaajayritys on jo tutkinut sitä riittävästi. Lisäksi väsyminen on monimutkainen ilmiö ja ovirakenteesta on hankala muodostaa matemaattista mallia. Väsymistä tuleekin tutkia rasituskokein, siinä vaiheessa, kun aletaan kehittää uutta ovea.

Lujuusoppia on tutkittu vuosisatojen ajan. Se on eräs mekaniikan haara, joka pohjautuu yleisesti mekaniikkaan ja erityisesti statiikkaan ja sen periaatteisiin ja peruskäsitteisiin. Lujuusopin tarkoituksena on tarkastella todellisia rakenteita, joten tärkeä lähtökohta on todellisten materiaalien mekaaniset ominaisuudet. Tavoitteena on tutkia kiinteiden kappaleiden mekaanista käyttäytymistä ja soveltaa näitä tietoja käytännön rakenteiden ja koneenosien mitoittamiseen. (Salmi 2000)

### 2.1 Lujuusopin peruskäsitteitä

Lujuusopin kannalta tärkeimmät peruskäsitteet ovat jännitys ja venymä. Yksinkertaisin tilanne on silloin, kun materiaaliltaan homogeeninen sauva on puristuksen tai vedon alaisena, jolloin sauvan poikkipintaan kohdistuu vetojännitys tai puristusjännitys. Kuvassa 1 on esitetty tilanne vetojännityksen osalta.



**Kuva 1.** Vetosauva (a), poikkileikkauksen normaalivoima (b) ja normaalijännitys (c). (Salmi 2000)

Kuvan 1a mukaan sauvaa kuormittaa molemmista päistä ulkoiset voimat  $F$ , joiden vaikutussuorien oletetaan yhtyvän sauvan pintakeskiön uraan. Leikkaamalla kappale kahteen osaan kuvan 1b mukaan saadaan leikkauskohtaan näkyviin kappaleen sisäisten voimien resultanttivoima eli normaalivoima  $N$ . Voiman ja vastavoiman lain mukaan saadaan tasapainoehdosta  $N = F$ . Sauvan sisäisen voimajakauman tiheyttä kutsutaan kuvan 1c tapauksessa normaalijännitykseksi  $\sigma$ . Kun poikkileikkauksen mitat ovat pieniä verrattuna sauvan pituuteen eikä poikkileikkausta oteta kovin läheltä kuormitettuja päitä, on poikkipinnan sisäinen voima jakautunut likimain tasaisesti poikkileikkauspintaan ja näin ollen normaalijännitys saadaan

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

missä  $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala. Kaavalla (1) laskettu normaalijännitys kuvaa poikkipinnan keskimääräistä normaalijännitystä.

Kun suoraan sauvaan kohdistuu aksiaalinen kuormitus, aiheuttaa se sauvan pituuden muutoksen  $\Delta L$ , joka saadaan laskettua erotuksesta

$$\Delta L = \hat{L} - L \quad (2)$$

missä  $L$  on kuormittamattoman sauvan pituus ja  $\hat{L}$  on kuormitetun sauvan lopullinen pituus. Sauvan pituuden muutoksen suhdetta sen alkuperäiseen pituuteen kutsutaan venymäksi  $\varepsilon$ . Venymän  $\varepsilon$  lauseke on

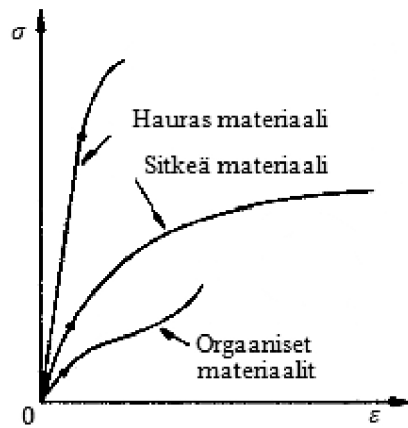


$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Venymä on positiivinen, jos sauva pitenee ja negatiivinen, jos sauva lyhenee. Se on dimensioton luku, joka ilmoitetaan prosentteina, promilleina tai mikroina. Tavanomaisilla materiaaleilla, kuten teräksellä venymät ovat promillen suuruusluokkaa. (Salmi 2000)

### 2.1.1 Jännityksen ja venymän välinen yhteys

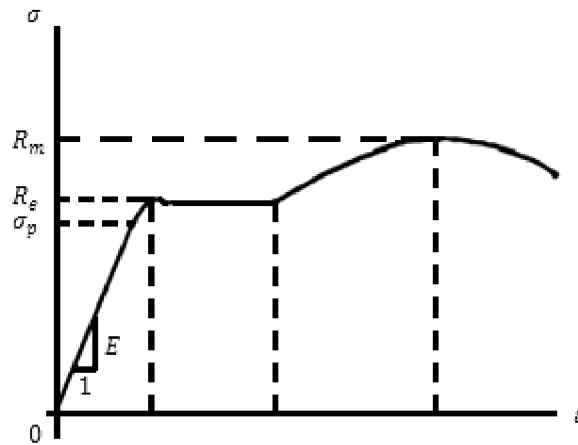
Materiaalien lujuusopillisista ominaisuuksista tärkeimpiä ovat jännitysten ja venymien välinen yhteys sekä kyky kestää kuormitusta murtumatta. Jännityksen ja venymän suhdetta kutsutaan  $\sigma\varepsilon$ -yhteydeksi ja tämä yhteys on erilainen eri materiaaleilla riippuen siitä onko kyseessä sitkeä vai hauras materiaali. Kuvasta 2 nähdään erilaisten materiaalien tyypillisiä  $\sigma\varepsilon$ -käyriä.



**Kuva 2.** Erilaisten materiaalien tyypillisiä  $\sigma\varepsilon$ -käyriä. (Salmi 2000)

Kuvan 2 mukaan nähdään, että hauraat materiaalit murtuvat melko pienillä venymillä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi erilaiset keraamit kuten lasi. Sitkeillä materiaaleilla venyminen on voimakasta ennen murtumista. Esimerkiksi erilaiset teräkset ja monet metalliseokset ovat sitkeitä materiaaleja normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Useimpien käytössä olevien rakennusmateriaalien käyttäytyminen on lineaarisesti kimmoista  $\sigma\varepsilon$ -käyrän alkuosalla suhteellisuusrajaan  $\sigma_p$  saakka. Tämän jälkeen jännitys kasvaa myötörajaan  $R_e$  ja siitä murtorajaan  $R_m$  saakka.  $E$  on kimmomoduuli. Rakennusmateriaalien käyttäytyminen nähdään kuvasta 3.



**Kuva 3.** Sitkeän materiaalin periaatteellinen  $\sigma\epsilon$ -käyrä. (Salmi 2000)

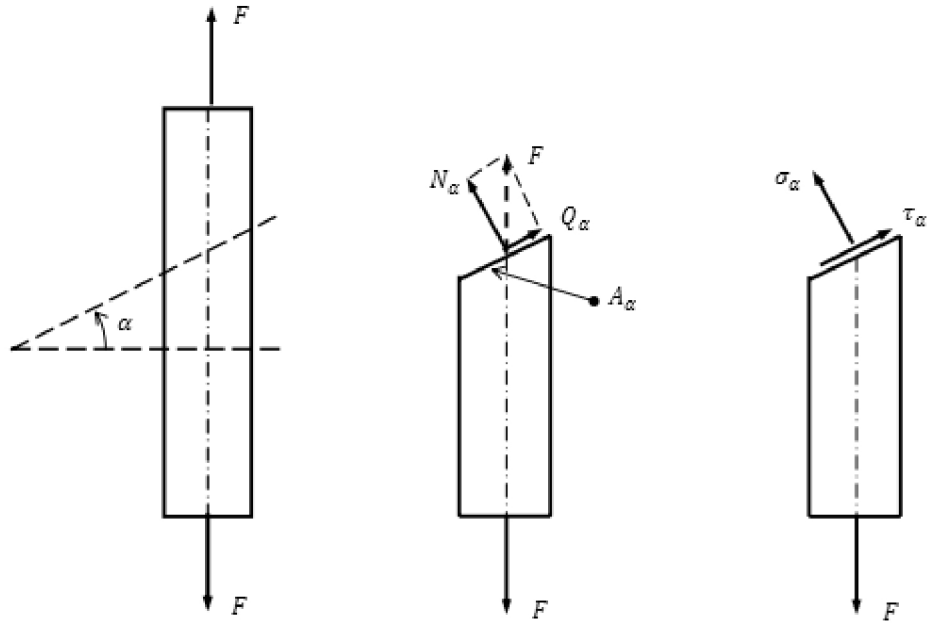
Rakenteet suunnitellaan useimmissa tapauksissa siten, että niiden käyttäytyminen voidaan olettaa lineaarisesti kimmoisaksi. Tällöin jännityksen ja venymän välinen yhteys voidaan esittää

$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

missä kerroin  $E$  on kimmomoduuli tai kimmokerroin. Yhtälöä (4) kutsutaan myös Hooke'n laiksi ja tämä on yksinkertainen jännitysvenymä-yhteyttä kuvaava yhtälö. (Salmi 2000)

### 2.1.2 Vinon leikkauksen jännitykset

Edellä on tarkasteltu aksiaalisesti venytetyn sauvan akselia vastaan kohtisuorassa olevaa poikkileikkauspinnassa vaikuttavaa normaalivoimaa ja normaalijännitystä. Leikataan sauva kuvan 4 mukaan vinolla leikkauspinnalla ja merkitään vinon pinnan alaa  $A_\alpha$ .



**Kuva 4.** Sauvan vinossa leikkauksessa vaikuttavat sisäiset voimat. (Salmi 2000)

Pystysuuntaisesta tasapainoehdosta seuraa, että leikkauspinnan voimaresultantti on  $F$ . Resultanttivoima voidaan jakaa kahteen komponenttiin, leikkauspintaa kohtisuorassa olevaan normaalivoimaan  $N_\alpha$  ja leikkauspinnan suuntaiseen leikkausvoimaan  $Q_\alpha$ . Kuvan perusteella voidaan kirjoittaa

$$N_\alpha = F \cos \alpha \quad (5)$$

ja

$$Q_\alpha = F \sin \alpha \quad (6)$$

Oletetaan voimien  $N_\alpha$  ja  $Q_\alpha$  jakautuvan tasaisesti koko leikkauspinnalle. Näiden voimien pintatiheyksiä sanotaan tässä tapauksessa leikkauspinnan normaalijännitykseksi  $\sigma_\alpha$  ja leikkausjännitykseksi  $\tau_\alpha$ . Näille jännityksille pätee

$$\sigma_\alpha = \frac{N_\alpha}{A_\alpha} \quad (7)$$

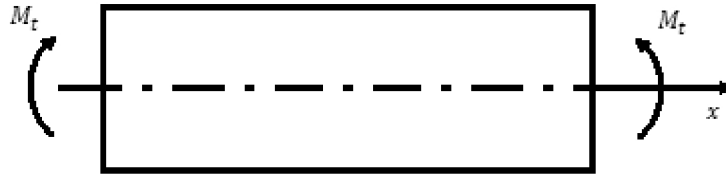
ja

$$\tau_\alpha = \frac{Q_\alpha}{A_\alpha} \quad (8)$$

Edellä mainittuja jännityksiä kutsutaan leikkauspinnan tiettyyn pisteeseen kuuluviksi jännityskomponenteiksi. (Salmi 2000)

### 2.1.3 Suoran palkin taivutus

Jos tunnetaan millaisia kuormituksia ja tukireaktioita palkissa on, voidaan sen poikkileikkauksen leikkausvoima ja taivutusmomentti määrittää tasapainoehtojen avulla. Yksinkertaisin tapaus on puhdas taivutus, jolloin palkissa ei ole lainkaan leikkausvoimia ja poikkileikkausta rasittaa ainoastaan taivutusmomentti. Puhdas taivutus on kuitenkin harvinainen tapaus, koska tavallisesti poikkileikkausta rasittaa myös leikkausvoima. Puhdasta taivutusta havainnollistaa kuva 5.

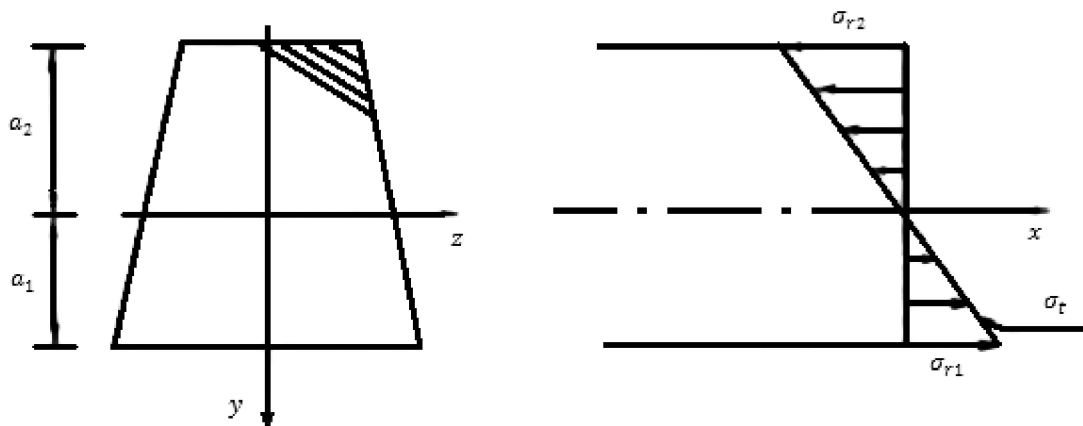


**Kuva 5.** Palkin puhdas taivutus. (Salmi 2000)

Puhtaassa taivutuksessa poikkileikkauksen jännityksiä kutsutaan taivutusjännityksiksi, joita merkitään  $\sigma_t$ . Taivutusmomenttia  $M_t$  vastaava taivutusjännitys  $\sigma_t$  y-akselin suhteen saadaan

$$\sigma_t = \frac{M_t}{I_z} y \quad (9)$$

jossa suuretta  $I_z$  kutsutaan poikkipinnan neliömomentiksi. Poikkileikkauksen ylä- ja alareunassa on taivutusjännityksen ääriarvot  $\sigma_{r1}$  ja  $\sigma_{r2}$ , joita kutsutaan myös reunajännityksiksi. Poikkileikkauksen jännitys jakauma tulee ilmi kuvasta 6.



**Kuva 6.** Taivutusjännityksen ääriarvot puhtaassa taivutuksessa. (Salmi 2000)

Kuvan 6 mukaan reunaetäisyyksiä  $a_1$  ja  $a_2$  käyttäen saadaan kaavan (9) avulla johdettua reunajännityksiksi

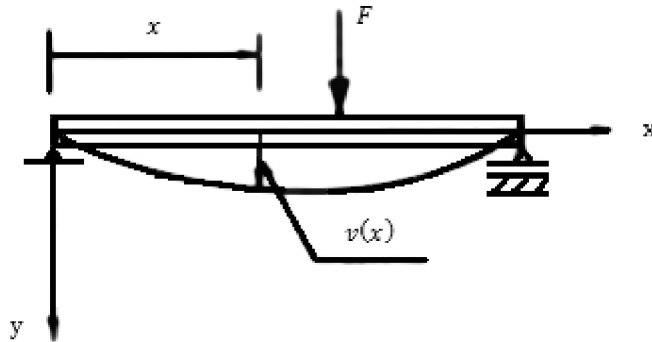
$$\sigma_{r1} = \frac{M_t}{I_z} a_1 \quad (10)$$

ja

$$\sigma_{r2} = \frac{M_t}{I_z} (-a_2) \quad (11)$$

Kaavoissa (10) ja (11) esiintyvät termit  $I_z/a_1$  ja  $I_z/a_2$  ovat poikkipinnan taivutusvastuksia  $W_1$  ja  $W_2$ . Neliömomentti ja taivutusvastus riippuvat poikkileikkauksen geometriasta ja ovat merkittäviä tekijöitä palkin jäykkyyttä ajatellen. Erilaisille poikkileikkauksille on erilaisia tapoja määrittää edellä mainitut geometriset suureet ja alan kirjallisuus antaa valmiita kaavoja erityyppisille poikkileikkauksille.

Palkkia taivutettaessa voimalla  $F$  siihen syntyy taipuma, jolloin palkin suora akseli taipuu tasokäyräksi. Tätä kutsutaan palkin kimmoviivaksi. Palkin taipumasta käytetään merkintää  $v$  ja se on yleensä positiivinen y-akselilla alaspäin. Palkin kimmoviiva on esitetty kuvassa 7.



**Kuva 7.** Palkin kimmoviiva. (Salmi 2000)

Tällöin kimmoviivalle pätee yhtälö

$$v''(x) \approx -\frac{M_t(x)}{EI(x)} \quad (12)$$

Yhtälöä (12) kutsutaan kimmoviivan linearisoiduksi differentiaaliyhtälöksi. Termi  $EI$  kuvaa palkin taivutusjäykkyyttä ja se riippuu neliömomentin  $I$  lisäksi kimmomodulist  $E$ . Kaavan (12) käyttäminen eri tapauksissa erilaisista palkin tuennoista riippuen vaatii kimmoviivan reunaehtoja, joiden avulla taipuman lopulliset kaavat on mahdollista johtaa. Kirjallisuudessa on useita vaihtoehtoja erilaisilla tuettujen palkkien taipumien laskemiseen. (Salmi 2000)

## 2.2 Väsyminen

Useimmat koneiden ja rakenteiden vauriot johtuvat väsymisestä. Väsyminen on hyvin monimutkainen ilmiö, joka riippuu monesta eri tekijästä. Rakenteessa tapahtuu väsymistä sen ollessa vaihtuvan kuormituksen alaisena. 1800-luvulla saksalainen insinööri A. Wöhler huomasi tutkimuksissaan, että väsymisen aiheuttamiin murtumiin ei vaikuta kokeisiin kulunut aika vaan kuormituskertojen lukumäärä. Wöhlerin mukaan rautametailit kestävät myös äärettömän monta kuormituskertaa, jos jännitykset pysyvät tietyn raja-arvon alapuolella. (Outinen & Salmi 2004)

Ovirakenteissa väsyminen aiheutuu pääosin liikenteen aiheuttamasta tärinästä. Tarkempaa väsymistarkastelua vaadittaessa ovirakenteita täytyy testata erilaisin väsytyskokein. Tässä diplomityössä ovirakenteen mitoitus tehdään staattisen sallitun taipuman perusteella. Mitoitetun rakenteen väsymiskestävyyttä tutkitaan myöhemmin väsytyskokein.

### 3. TUTKITTAVAT OVIRAKENTEET

Ovirakenteet vaihtelevat sovelluskohteesta riippuen eri liikennöitsijöiden välillä. Ajoneuvon runko luo omat vaatimuksensa oven muodolle ja käyttökohde sen kestävyydelle. Tässä diplomityössä on tarkoituksena tarkastella kolmea nykyistä ovimallia, jotka ovat aktiivisessa liikennekäytössä niin linja-autoissa kuin raitiovaunuissakin.

Ominaista ovirakenteissa on se, että niiden karmeissa on käytetty yhtä tai kahta erilaista alumiiniprofiilia, jotka on liitetty toisiinsa kiinni hitsaamalla. Alumiini on lämpökäsiteltyä ja helposti hitsattavaa tyyppiä. Ovissa käytetty lasi on jäykkä materiaali, jota käytetäänkin tarkoituksenmukaisesti lisäämään kiertojäykkyyttä. Profiilien reunassa on ura, mikä toimii kumitiivisteiden kiinnitysurana.

#### 3.1 Ulospäin kääntyvät ovirakenteet

Ulospäin kääntyvää ovimallia käytetään pääasiassa kaupunkiliikenteen linja-autoissa. Ovijärjestelmä on saatavana sekä yksilehtisenä että kaksilehtisenä. Ovikoneisto sijaitsee oven yläpuolella ja niitä on saatavilla pneumaattisina ja sähköisinä. Tässä työssä tarkastellaan kahta ulospäin kääntyvää ovirakennetta, joiden geometriset mitat on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Ulospäin kääntyvien ovilehtien mitat.

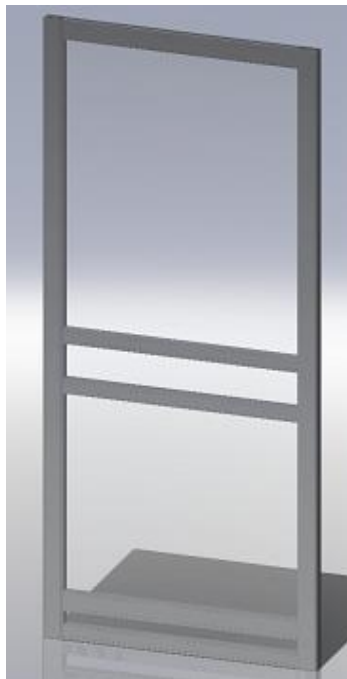
	<b>Ulospäin kääntyvä kaareva ovilehti (kaksilehtinen)</b>	<b>Ulospäin kääntyvä suora ovilehti</b>
Korkeus (mm)	2127	595
Leveys (mm)	1865	828

Kaksilehtisessä ovijärjestelmän profiileissa on kaareva muoto sivulta päin katsottuna, mikä johtuu ajoneuvon ulkoreunan asettamista vaatimuksista. Tässä ovesa on käytetty kahta erilaista alumiiniprofiilia, joista ohuempaa reunaprofiileina ja vahvempaa ylä- ja alaprofiileina. Oven alareunassa on myös yksi lisäprofiili. Ovilehtien rakenne tulee ilmi kuvasta 8.



**Kuva 8.** Kaksilehtinen ulospäin kääntyvä rakenne.

Yksiovisessa rakenteessa on käytetty oven karmeissa vahvempaa profiilia ja lisäprofiileita oven keskellä ja alhaalla erilaisten varusteiden, kytkentöjen ja toimilaiteliitännöjen takia. Alumiiniprofiilit ovat suorat, joten pelkkä runko on yhtä jäykkä riippumatta taivutetaanko ovea sisä- vai ulkopuolelta. Alumiinirunkoon liimattu lasi tuo lisää jäykkyyttä oveen. Ovirakenne nähdään kuvasta 9.



**Kuva 9.** Yksilehtinen ulospäin kääntyvä rakenne.



### 3.2 Sisäänpäin kääntyvä ovirakenne

Kaksiovinen sisäänpäin kääntyvä ovijärjestelmä on käytössä raitiovaunuissa tai matalalattiaisissa kaupunkibusseissa. Ovet toimivat pneumaattisesti tai sähkökäyttöisesti ovien yläpuolella sijaitsevan ovikoneiston avulla. Kääntövoima välittyy käyttötangon avulla oven alareunaan. Oven geometriset mitat tulevat ilmi taulukosta 2.

**Taulukko 2.** Sisäänpäin kääntyvän oven mitat.

	Sisäänpäin kääntyvä suora ovilehti
Korkeus (mm)	2048
Leveys (mm)	603

Tämän kaksoisoven rakenne on yksinkertainen, koska siinä on vain pelkät ylä- ala- ja reunaprofiilit eikä muita lisäprofiileja. Reunoilla on käytetty ohuempaa profiilia ja ylhäällä ja alhaalla vahvempaa profiilia. Kaksiovinen rakenne tulee ilmi kuvasta 10.



**Kuva 10.** Kaksilehtinen sisäänpäin kääntyvä ovirakenne.

Tämän ovityypin alumiinirungon rakenne on kohtalaisen heikko, koska se on verrattain korkea eikä siinä ei ole ohuemman profiilin lisäksi käytetty muita jäykisteitä lisäämään jäykkyyttä. Lasi lisää oven jäykkyyttä ja on merkittävä vahvike tämän oven rakenteeseen.

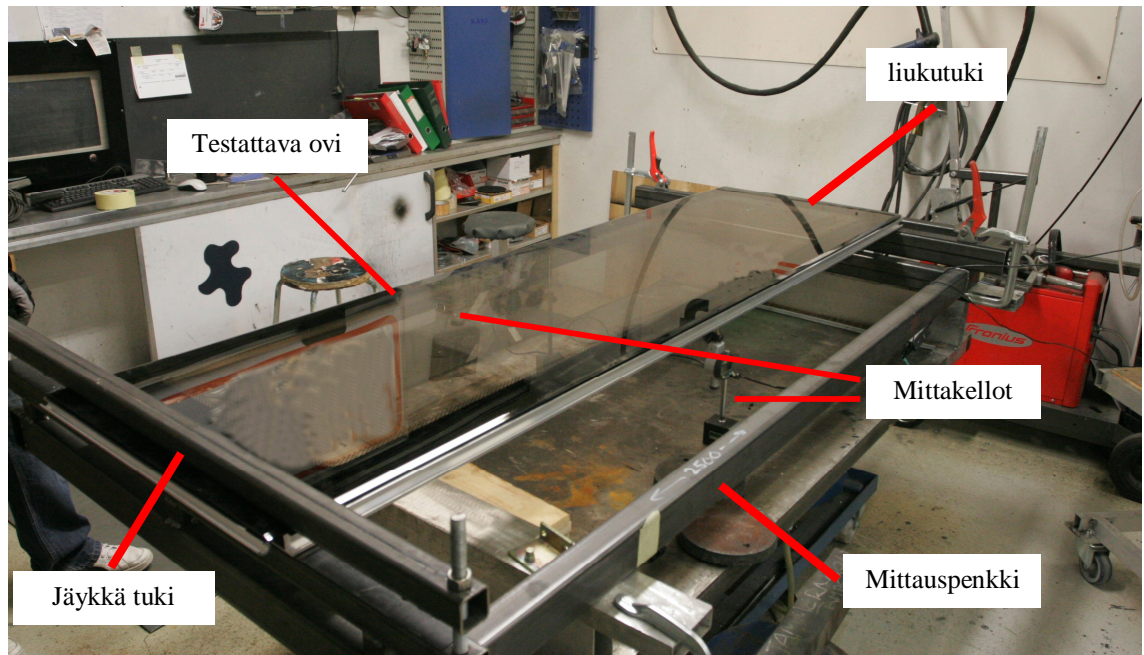
## 4. NYKYISTEN OVIRAKENTEIDEN KOKEELLINEN ANALYSOINTI

Oven rakenteisiin kohdistuu useita erilaisia rasituksia. Esimerkiksi ajoneuvon ollessa liikkeessä tuuli aiheuttaa ovea avaavan kuormituksen. Näin ollen se tulee ottaa huomioon ovilehteä suunniteltaessa. Ovea suurin kiinnipitävä voima on oven yläreunassa, missä sijaitsee pneumaattinen tai sähköinen oven avaus- ja kiinnipitomekanismi. Erilaisten mekaanisten joustojen takia kiinnipitävä voima on huomattavasti pienempi oven alareunassa kuin yläreunassa, joten tämä antaa oven rakenteelle tiettyjä vaatimuksia jäykkyyttä ajatellen.

Tämän diplomityön yhtenä tarkoituksena on testata ovien rakenteellista jäykkyyttä. Testien tavoitteena on muodostaa tiettyjä raja-arvoja uuden ovityypin kehittelyyn. Kolmipistetaivutuskokeen avulla tutkitaan ovilehtien jäykkyyttä. Mittauksissa ovilehdet tuetaan päistään ja annetaan niille tietynsuuruinen ulkoinen rasitus, jonka jälkeen rakenteen siirtymä mitataan kuormituskohdassa. Tämä testi suoritetaan, koska se on yksinkertainen tapa saada rakenteen jäykkyyttä kuvaavia arvoja mitattua. Tämänkaltaisen testin tuloksia on myös mahdollista tarkastella lujuusopin palkkikaavoja hyväksikäyttäen. Testien avulla haetaan raja-arvoa ovilehtien maksimitaipumalle ja tuloksien pohjalta voidaan aloittaa uuden ovirakenteen kehittäminen.

### 4.1 Tutkimuslaitteiston esittely

Mittaukset suoritettiin tilaajayrityksen prototyypipajalla, missä testejä varten oli tehty eripituisille oville soveltuva mittauspenkki. Testipenkki oli tehty teräspalkeista hitsaamalla ja se oli asetettu nostopöydälle kahden alumiinisen palkin päälle. Testipenkin toisessa päässä on kiinteä tuenta, minkä avulla ovi pysyy jäykästi penkissä kiinni. Toinen pää on liukuva, jotta sen avulla voi siirtää toisen pään tuentaa oven pituudesta riippuen. Liukuva tuki on jäykästi kiinnitettävissä penkkiin. Testipenkin rakenne tulee ilmi kuvasta 11.



**Kuva 11.** Testipenkki, jossa ovi tuettuna.

Ulkoisena kuormituksena käytettiin eripainoisia punnuksia, joita yhdistelemällä saatiin riittävä määrä kuormitusta. Punnuksina käytettiin puulautoja, teräslevypainoja, teräspalkkia ja betonipalkkia. Punnuksien massat on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Mittauksissa käytettyjen punnuksien massat ja kuormitukset.

Punnus	Massa (kg)
Laudat	3,4
Teräslevy	10,6
Teräspalkki	22,6
Betonipalkki	32,4

Puulautoja käytettiin muiden punnuksien asetuslustoja runkojen päällä, jotta oveen saatiin kohdistettua mahdollisimman tasainen kuormitus. Tarkoituksena oli testata käytäytykö rakenne lineaarisesti kuormaa lisättäessä.

Siirtymät mitattiin kahdella digitaalisella mittakellolla, jotka oli asetettu molemmin puolin oven karmeja samaan kohtaan. Kuvassa 12 nähdään mittakellojen asettelu testien aikana.



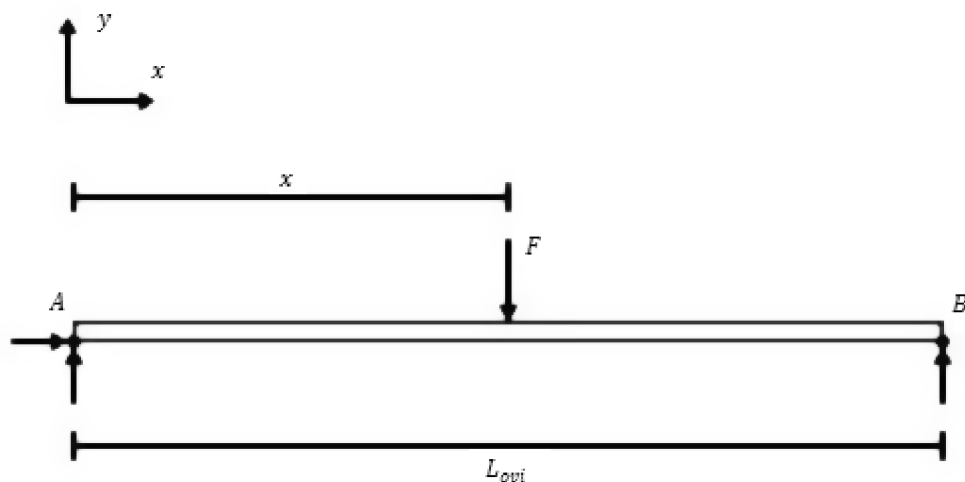
**Kuva 12.** Mittakellot mittaustilanteessa.

Kellojen näyttämien perusteella nähtiin oven taipuma kuormituskohdassa. Kahdella kellolla varmistettiin, että kuormitus oli mahdollisimman keskellä ja se vaikutti tasaisesti oven rakenteeseen. Mittakellot olivat Mitutoyon digitaalisia mittakelloja. Kelloilla mitattiin absoluuttista siirtymää, joten ne nollattiin aina alkutilanteessa.

## 4.2 Kolmipistetaivutuskoe

Kolmipistetaivutuskokeessa ovet tuettiin molemmista päistään eri tavoin ja ulkoinen kuormitus saatiin aikaan eripainoisilla punnuksilla. Tämän jälkeen siirtymän arvo mitattiin jokaisella erisuuruksella kuormalla. Kuorma oli asetettu kahden suoran oven mittaustilanteissa keskelle ovea. Kaarevan oven tapauksessa kuorma oli asetettu alumiiniprofiilin suoraan kohtaan, joka on kaarevien kohtien välissä. Leveyssuunnassa katsottuna kuormituskohta oli kaikkien ovien tapauksessa keskellä, mikä nähtiin molemmista pystyprofiileista mitatuista siirtymien tuloksista. Mittaukset tehtiin alumiinirungoille sekä rungoille, joissa oli lasi liimattuna. Tästä nähtiin mitä vaikutuksia lasi tuo oven jäykkyyteen. Mittaukset toistettiin kolme kertaa.

Ovet asetettiin penkkiin vaakatasoon siten, että alareuna tuettiin jäykästi ja yläreuna tuettiin siten, että tukireaktio oli pelkästään ylöspäin. Suorien ovien mittauksissa testattiin pelkkä alumiinirunko vain yhdeltä puolelta. Kaarevan oven tapauksessa ovi mitattiin molemmiin puoliin, jotta nähdään, mitä kaarevuus tuo lisää jäykkyyteen. Mittauksien periaatteen mukaan ovi voidaan esittää käyttämällä piirrosta palkista, joka on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13.** Mittauksien kuormitustilanteen periaatekuva.

Tukireaktiot kohdissa  $A$  ja  $B$  jätetään huomioimatta, koska niillä ei ole oleellista merkitystä mittauksien kannalta. Koordinaatiston nollakohdaksi valittiin oven alareuna tuen  $A$  kohdalla.  $x$ -koordinaatti ilmaisee kuormituskohdan ja  $L_{ovi}$  oven pituuden. Suorissa ovissa kuormituskohta oli keskikohdassa ovea ja kaarevan oven tapauksessa kahden kaarevan osan välillä olevalla suoralla osalla. Taulukossa 4 on esitetty mittaukseen liittyvät kuormituskohdat ja oven pituudet.

**Taulukko 4.** Kuormituskohdat ja oven pituudet.

	Ulospäin kääntyvä kaareva ovilehti	Ulospäin kääntyvä suora ovilehti	Sisäänpäin kääntyvä suora ovilehti
$x$ (mm)	956	932,5	1024
$L_{ovi}$ (mm)	2127	1865	2048

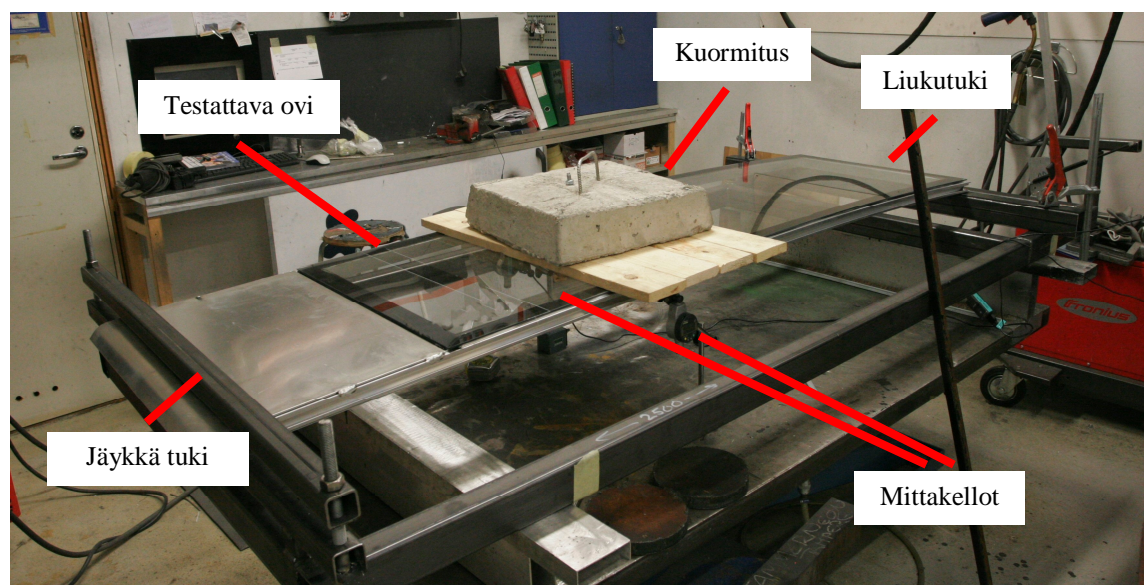
Ulkoisen kuormituksen  $F$  arvoa kasvattamalla mitattiin jokaisella eri kuormituksella oven taipuma. Siirtymän arvo mitattiin kuudessa eri kohdassa, nollakohta mukaan lukien, erilaisia punnuksia yhdistelemällä. Taulukossa 5 on esitetty kuormittavien massojen ja voimien eri arvot.

**Taulukko 5.** Mittauksessa käytettyjen kuormitusten arvot.

Punnus	Massa (kg)	Kuormitus (N)
Ei mitään	0	0
Laudat	3,4	33
Laudat + teräslevy	14,0	137
Laudat + teräspalkki	26,0	255
Laudat + betonipalkki	35,8	351
Laudat + teräslevy + betoni- palkki	46,4	455

### Ulospäin kääntyvä kaareva ovilehti

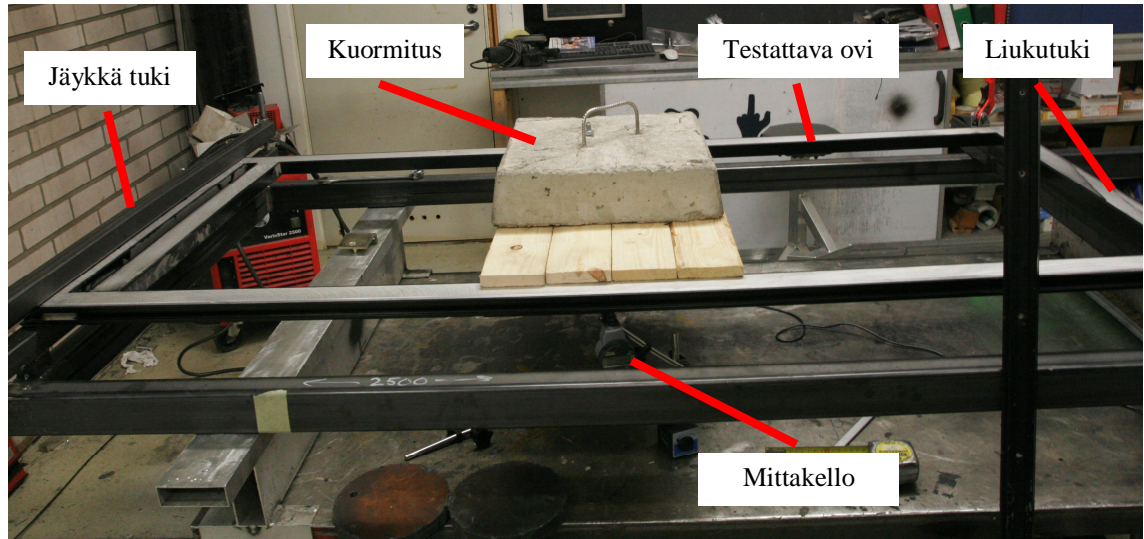
Kaarevan rakenteensa vuoksi ovilehti testattiin molemmin puolin ilman lasia ja lasin kanssa. Tämän perusteella nähtiin mitä vaikutuksia alumiinirungon muoto tuo oven jäykkyyteen. Kuvassa 14 on esitetty mittaustilanne maksimikuormalla.

**Kuva 14.** Taivutuskoe ulospäin kääntyvälle kaarevalle ovelle. Kuormitus sisäänpäin maksimikuormalla.



### Ulospäin kääntyvä suora ovilehti

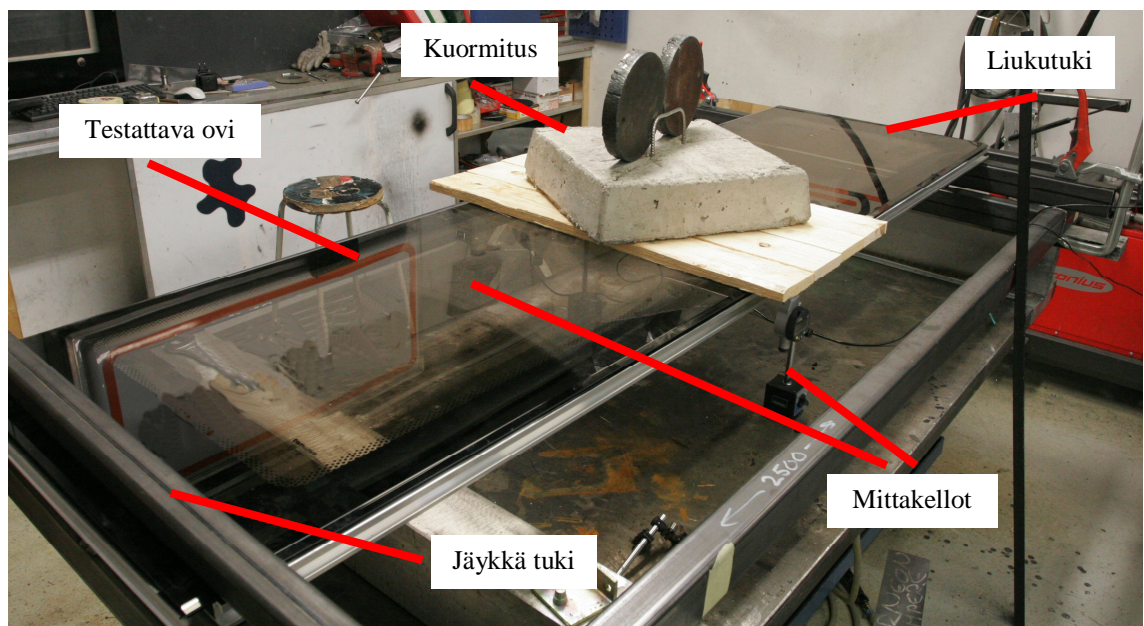
Ulospäin kääntyvä suora ovilehti testattiin ilman lasia, koska tähän ei ollut lasia saatavilla. Mittaussarja toistettiin kolme kertaa. Mittaustilanne tietyllä kuormalla on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 15.** Taivutuskoe ulospäin kääntyvälle ovelle.

### Sisäänpäin kääntyvä suora ovilehti

Sisäänpäin kääntyvä ovilehti testattiin ilman lasia ja lasillisena. Pelkkä runko testattiin vain toiselta puolelta symmetrian takia. Lasillinen testattiin molemmiin puolin. Mittaussarja toistettiin jokaisessa tapauksessa kolme kertaa. Ovilehti lasin kanssa mittaustilanteessa kuormituksen alaisena on esitetty kuvassa 16.



**Kuva 16.** Sisäänpäin kääntyvän ovilehden mittaustilanne kuormitettuna.

### 4.3 Nykyisten ovirakenteiden mittaustulokset

Suorista ovista mitattiin taipuma vain yhdeltä puolelta, koska profiilien symmetrian perusteella oletettiin tulosten vastaavan toisiaan. Kaarevan oven tapauksessa siirtymät mitattiin molemmin puolin profiilin kaarevasta muodosta johtuen. Lasilliset ovet mitattiin molemmin puolin siten, että lasi oli mittaustilanteessa alumiinirungon päällä ja alla. Tästä nähtiin, miten lasi vaikuttaa mittaustuloksiin sen ollessa veto- tai puristusjäännityksen alaisena. Mittaussarjat suoritettiin kolmesti peräkkäin. Ovilla käytetyn lasin paksaus oli kaarevalla ovella 4 mm ja sisäänpäin kääntyvällä ovella 6 mm.

#### Ulospäin kääntyvä kaareva ovilehti

Mittaustulokset on esitetty taulukossa 6. Jokaista kuormituskohtaa vastaava siirtymän keskiarvo nähdään laskettuna jokaisesta mittaussarjasta.

**Taulukko 6.** Ulospäin kääntyvän kaarevan ovilehden mittaustulokset.

Kuormitus (N)	Siirtymä ilman lasia		Siirtymä lasin kanssa	
	Sisäänpäin (mm)	Ulospäin (mm)	Sisäänpäin (mm)	Ulospäin (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
33	0,7	0,5	0,5	0,5
137	3,1	3,1	2,5	2,3
255	5,8	5,6	4,7	4,3
351	7,9	7,6	6,4	5,9
455	10,3	9,7	8,3	7,6

#### Ulospäin kääntyvä suora ovilehti

Alumiinirungolle suoritettiin yksi kolmen mittaussarja kuormittaen ovilehteä vain ulkoa päin. Mittauksen tulokset nähdään keskiarvostettuina taulukossa 7.

**Taulukko 7.** Ulospäin kääntyvän oven mittaustulokset.

Kuormitus (N)	Siirtymä sisäänpäin (mm)
0	0,0
33	0,3
137	1,3
255	2,5
351	3,5
455	4,6



## Sisäänpäin kääntyvä suora ovilehti

Mittaussarjat toistettiin kolme kertaa jokaiselle mittaustilanteelle. Mittaustulokset on esitetty keskiarvotuloksina taulukossa 8.

**Taulukko 8.** Sisäänpäin kääntyvän ovilehden mittaustulokset.

Kuormitus (N)	Siirtymä ilman lasia	Siirtymä lasin kanssa	
		Sisäänpäin (mm)	Ulospäin (mm)
0	0,0	0,0	0,0
33	0,6	0,4	0,3
137	2,4	1,6	1,5
255	4,5	2,9	2,8
351	6,1	4,0	3,8
455	7,9	5,2	5,0

Tuloksista nähdään, että lasi tuo lisää jäykkyyttä jokaiseen ovirakenteeseen. Lasi jäykistää eniten sisäänpäin kääntyvää ovea, minkä taipuma on noin 36 % pienempi kuin pelkällä alumiinisella rungolla. Kaarevan oven taipuma on 20 % pienempi lasillisena. Kuormaa lisättäessä annettiin tietyn asettumisajan ennen siirtymän mittaamista. Tämän aikana liima lasin ja alumiinin välissä antoi hieman periksi. Tuloksien perusteella voidaan todeta, ettei taipuman arvolla ole eroa, kun lasi on veto- tai puristusjäännityksen alaisena. Lasi siis jäykistää ovilehteä yhtä paljon molempiin suuntiin taivutettaessa.

Mittaustulosten pohjalta voidaan todeta, että ulospäin kääntyvä suora ovi on jäykin, koska se taipuu vähiten. Heikoin ovi tulosten perusteella on ulospäin kääntyvä kaareva ovi, koska se taipuu eniten lasin kanssa ja ilman lasia. Rakenteellisesta jäykkyydestä ei kuitenkaan voi päätellä mitään ennen tarkempaa lujuusopillista tarkastelua. Rakenteen jäykkyys täytyy analysoida lujuusopin mukaisesti, koska ovet ovat erimittaisia.

Kolmipistetaivutuksen ansiosta nähtiin, että ovirakenne käyttäytyy lineaarisesti koko kuormitusalueella. Uusi ovirakenne voidaan näin ollen mitoittaa lujuusopin palkki-kaavojen avulla. Mittauksista saatiin raja-arvot ovirakenteen taipumalle, johon uuden oven tulisi päästä.

## 5. OVIRAKENTEEN KEHITTELY

Uuden ovirakenteen kehittäminen aloitettiin siltä pohjalta, että lasi korvataan polykarbonaatilla. Rakenteessa esiintyvät hitsaukset pyrittiin poistamaan, jotta tuotannon läpimenoaika pienenesi ja alumiinin työstäminen helpottuisi. Nykyiseen oveen verrattuna jäykkyyden tulee pysyä samana. Lisävaatimuksia rungon jäykkyyteen aiheuttaa se, että PC:n (Polykarbonaatti) jäykkyys on paljon pienempi kuin lasin. (Vink 2011) Tämä pyrittiin ratkaisemaan oikeanlaisella profiilien mitoituksella. Uuden oven tuli olla kaikin puolin kevyempi ja kokoonpanon helpompaa verrattuna nykyiseen oveen.

Tuotekehitysprosessissa sovelletaan Pahlin ja Beitzin menetelmää. Siinä luodaan vaatimuslistan pohjalta ovelle toimintorakenne, mikä pitää sisällään ovelle käytettyjen materiaalien ja osien työstämisen sekä oven kokoamisen valmiiksi tuotteeksi. (Pahl & Beitz 1992) Näin pyritään vastaamaan parhaimmalla mahdollisella tavalla kaikkiin uuden oven vaatimuksiin.

### 5.1 Vaatimuslista

Vaatimuslistaa varten täytyy selvittää kaikki vaadittavat tavoitteet ja rajoitukset virheellisten kehitelmien välttämiseksi. Vaatimuslistaan kerätään vaatimukset ja toivomukset, joihin uuden ovirakenteen on päästävä. Vaatimukset ovat pakollisia ehtoja, joiden pitää täytyä kaikissa mahdollisissa olosuhteissa. Toivomukset ovat mahdollisesti mukana sillä varauksella, että niiden toteutumisesta joudutaan sallimaan kohtuullisia lisäkustannuksia. (Pahl & Beitz 1992)

Listaan kerätään kaikki vaatimukset mekaanisista, tuotannollisista ja standardien asettamista ehdoista, joihin valmiin oven on päästävä. Lisäksi listaan kerätään toiveet, joita pyritään mahdollisuuksien mukaan täyttämään. Vaatimuslistassa V = vaatimus, T = toivomus, pvm = päivämäärä jolloin ehto on luotu tai muokattu. Vaatimuslista on esitetty taulukossa 9.

**Taulukko 9.** Vaatimuslista.

Vaatimukset	V/T	pvm
Taipuma kuormalla 455 N Kaareva ulospäin kääntyvä < 7,6 mm Suora ulospäin kääntyvä < 4,6 mm Sisäänpäin kääntyvä < 5,0 mm	V	26.7.2011
Mahdollisimman paljon läpinäkyvää aluetta	T	16.6.2011
Kevyempi kuin nykyinen ovi	V	10.11.2011

Ei hitsauksia	V	16.6.2011
Maksimi paksuus ovilehdille 40 mm	V	16.6.2011
Maksimi leveys profiileille 60 mm	V	15.11.2011
Helppo koneistettavuus, taivutettavuus	V	17.6.2011
Lyhyt toimitusaika (Ei välttämättä sama kuin materiaalin toimitusaika, jos materiaali on helposti varastoitavissa ja mahdollisesti myös pinnoitettavissa itse)	V	17.6.2011
Graffitit poistuvat itsestään	T	17.6.2011
Naarmuuntumaton	T	17.6.2011
UV-valon kestävä kokonaisuus	V	17.6.2011
Mahdollisimman vähän virhemahdollisuuksia valmistuksessa	V	17.6.2011
Mahdollisimman halpa	T	17.6.2011
T-urat reunoissa kumiprofiileille	T	17.6.2011
Vaihtoehto edelliseen. Reunoihin teippitiivistet	T	17.6.2011
Huurtumaton	T	17.6.2011
Lämmityselementti kiinnitettävissä	T	17.6.2011
Riittävästi ääntä eristävä	T	17.6.2011
Muotonsa muistava (Lommot palautuvat itsestään takaisin)	T	17.6.2011
Sileä ulkopinta	V	17.6.2011
Maalattavissa ulkopuolelta	T	17.6.2011
Rungon maalaustarve vähäinen	T	17.6.2011
Saatavissa monella eri värisävyllä	T	20.6.2011
E-hyväksytty	V	20.6.2011
Läpinäkyvyys > 90 %	T	20.6.2011
Hyvä ajoneuvokemikaalien kesto	V	20.6.2011

Vaatimusten ja toiveiden luoajat ilmaistaan yleensä vaatimuslistassa, mutta ne on jätetty tilaajayrityksen toiveen mukaan pois tästä listasta.

## 5.2 Abstrahointi

Vaatimuslistan luomisen jälkeen analysoidaan oleellisia reunaehtoja ja vaatimuksia, jotta saadaan ongelman ydin paremmin selville. Tämä onnistuu abstrahoinnalla, jolloin vaatimuslistaa muokkaamalla saadaan oleellimmat ehdot, mitkä on mahdollista ilmaista yhden virkkeen avulla. Abstrahoinnin tuloksena saadaan siis ongelma, johon lähdetään etsimään ratkaisua. (Pahl & Beitz 1992)

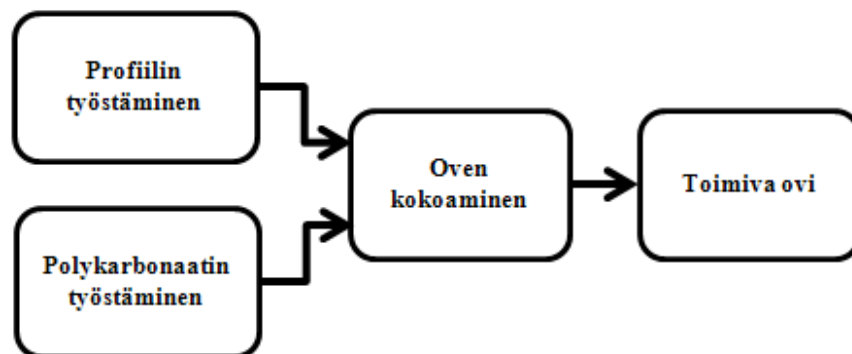
Abstrahointi etenee vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa jätetään listasta kaikki toiveet pois. Toisessa vaiheessa jätetään sellaiset vaatimukset pois, jotka eivät välittömästi koske toimintaa ja sen oleellisia ehtoja. (Pahl & Beitz 1992) Eli oven tapauksessa sen tulee pysyä kiinni ajon aikana ja aueta mahdollisimman helposti. Sen tulee myös olla mahdollisimman tukeva ajoneuvon runkoa vasten. Lisäksi sen tulee toimia turvallisesti koko elinkaarensa ajan. Oven tulee myös olla helposti toimitettavissa. Kolmannessa vaiheessa muutetaan määrälliset vaatimukset laadullisiksi ja näin saadaan:

- yhtä jäykkä kuin nykyinen ovi lasin kanssa
- mahdollisimman kevyt kokonaisuus
- ei hitsauksia
- mahdollisimman ohut ovi
- UV-valonkestävä
- E-hyväksytty
- lyhyt toimitusaika
- helppo valmistettavuus

Tämän jälkeen laajennetaan mielekkäästi tähän asti tunnettua. Abstrahoinnin tuloksena saadaan muodostettua ongelmasta neutraali ratkaisu eli saadaan tiivistettyä ongelma yhteen virkkeeseen (Pahl & Beitz 1992): *Helposti valmistettava, mahdollisimman kevyt, ohut ja jäykkyydeltään nykyiseen verrattava ovi.*

### 5.3 Toimintorakenteen laatiminen

Toimintorakenteen laatiminen aloitetaan muodostamalla kokonaistoiminto, mikä pitää sisällään oven kokoonpanon toimivaksi oveksi materiaalien esikäsittelyistä alkaen. Materiaalien esikäsittelyyn sisältyy reunaprofiilien muokkaaminen, työstäminen ja polykarbonaatin esivalmistelu. Oven kokoamiseen liittyy rungon profiilien toisiinsa liittäminen ja PC-levyjen kiinnittäminen oven runkoon. Lopputuloksena saadaan toimiva ovi, mikä täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset ja standardit. Kuvassa 17 hahmotellaan toimintorakenne.



**Kuva 17.** Oven kokonaistoiminto tuotannosta toimivaksi oveksi.

Profiilin työstäminen – kohdassa valmiit profiilit esivalmistellaan ja työstetään ennen kokoonpanoa. Profiilit leikataan sopivan mittaisiksi ja taivutetaan vaatimusten mukaisesti. Lisäksi niihin tehdään vaadittavat poraukset ja muut esivalmistelut.

Polykarbonaatin esivalmisteluun kuuluvat tarvittavat leikkaukset, poraukset ja mahdollisesti kovapinnoitteen poistaminen. (Muovimuotoilu 2012) Esivalmistelussa otetaan huomioon käytetäänkö yksinkertaista vai kaksinkertaista lasia. Tässä kohdassa on huomioitava myös se, miten levyt kiinnitetään toisiinsa. Levyjen kiinnittäminen riippuu siitä, käytetäänkö jonkinlaista ydinmateriaalia levyjen välissä vai kiinnitetäänkö levyt runkoon sellaisinaan.

Oven kokoamisessa on keskeistä, miten ovi saadaan koottua helposti ja nopeasti. Tässä vaiheessa runko kootaan kiinnittämällä alumiiniprofiilit toisiinsa. Myös PC-levyt kiinnitetään runkoon tässä vaiheessa. Lisäksi muut toimilaitteet tai varusteet kiinnitetään ovilehteen. Uuden oven on oltava nopeammin valmistettavissa kuin nykyisen oven. Tähän pyritään vaikuttamaan siten, että hitsaukset poistetaan rakenteesta. Näin ollen päästään eroon myös aikaa vievästä alumiinin hiomisesta.

Valmiin oven rakenne täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset. Uuden oven tulee siis olla kaikin puolin parempi kuin nykyinen ovi. Sen tulee olla yhtä jäykkä, mutta kevyempi. Lisäksi tuotantoon kuluvan ajan tulee olla lyhyempi.

## 5.4 Morfologinen matriisi

Tässä kohdassa esitetään toimintorakenteelle erilaisia vaihtoehtoja. Uuden ovirakenteen kehittelyn tueksi muodostetaan Pahlin ja Beitzin menetelmää soveltaen morfologinen matriisi, jossa oleelliset toimintorakenteen vaiheet ja niiden toteutustavat esitetään taulukkomuodossa. Tällöin tuotekehitysprosessi helpottuu ja sopivien ratkaisumuunnelmien keksiminen on helpompaa. Niiden arvioiminen on myös yksinkertaisempaa. Morfologinen matriisi on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Morfologinen matriisi.

Profiilivaihtoehdot	Alumiininen U-profiili	Teräksinen U-profiili	Alumiininen suorakaideprofiili	
Profiilien kiinnittäminen toisiinsa	Ruuviliitos	Niittiliitos		
Polykarbonaatin kiinnittäminen oven runkoon	Liimaus	Niittiliitos	Ruuviliitos	Mekaaninen liitos
Toimilaitteiden kiinnittäminen	Ruuviliitos	Niittiliitos		

Taulukkoon on kerätty kaikki tämän diplomityön kannalta oleelliset vaihtoehdot toimintorakenteen toteuttamiseksi. Esikäsittelyvaiheen toiminnoille ei esitetä erilai-

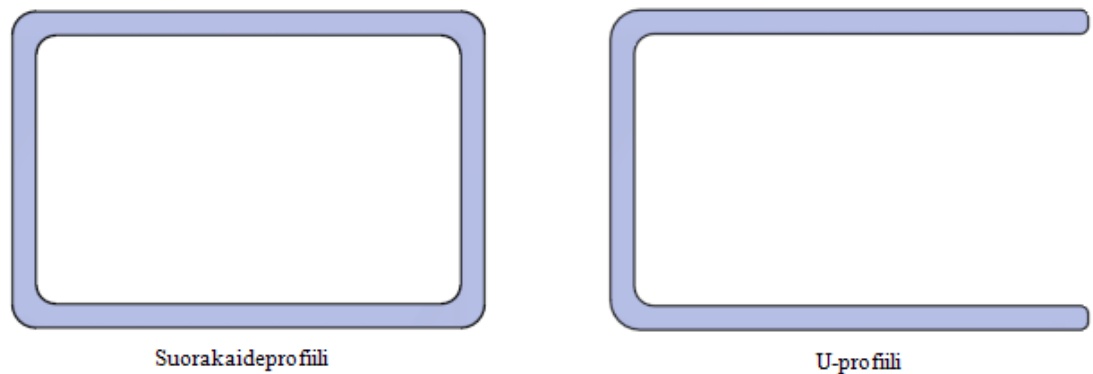
sia vaihtoehtoja, koska ne eivät ole oleellisia tämän diplomityön kannalta. Ne voidaan toteuttaa samalla tavalla kuten nykyisille oville, jotta tuotantoon ei olisi tarpeen tehdä muutoksia.

## 5.5 Profiilivaihtoehdot

Uuden oven rakenteessa tulee olla riittävän jäykkä runko, jotta sen jäykkyys olisi nykyisen kaltainen. Nykyiset profiilit valmistetaan alumiinia pursottamalla, joten niihin on mahdollista saada monimutkaisia muotoja. Profiilien muoto on myös optimoitavissa tilavuuden suhteen, joten sillä saavutetaan erinomainen lujuus suhteessa painoon. (Kinos et al. 1998)

Käytettävän profiiliin valinnassa otetaan huomioon se, että profiilit ovat taivutettavissa ja helposti kiinnitettävissä toisiinsa. Profiilit tulee valita siten, että ovesta on mahdollisimman sileä pinta. Niiden tulee olla myös helposti koneistettavissa ja mahdollisimman kevyitä. Nykyisen oven profiileihin verrattuna uuden profiilin tulee olla jäykempi, koska polykarbonaatti ei ole niin jäykkä materiaali kuin lasi.

Profiilin poikkileikkausta rajoittavat vaatimukset ovilehden paksuudesta ja profiilin leveydestä. Tässä diplomityössä otetaan huomioon avoimet U-profiilit alumiinista ja teräksestä sekä suljettu suorakaiteen muotoinen alumiiniprofiili. Nämä profiilit otetaan huomioon, koska ne ovat soveltuvimmat vaihtoehdot uudeksi profiiliksi tämänkaltaises-  
sa sovelluksessa. Kuvassa 18 on esitetty huomioitavat profiilit.



**Kuva 18.** Profiilivaihtoehdot.

Suorakaideprofiili on jäykempi kuin U-profiili, mutta avointa profiilia voi käyttää ikään kuin listana rungossa. Se on myös hiukan kevyempi kuin suorakaideprofiili. Valmistettavuuden kannalta alumiini on parempi kuin teräs, sillä sen voi pursottaa sekä suorakaiteeksi että U-profiiliksi. Teräsprofiili on kuitenkin tässä sovellutuksessa hyvä jäykkyytensä vuoksi.

### 5.5.1 Profiilin mitoittaminen

Profiilia mitoittaessa täytyy ottaa huomioon polykarbonaatin jäykkyys, koska se on paljon pienempi kuin lasilla. Tämä tarkoittaa sitä, että rungon tulee kestää lähes kaikki oveen kohdistuvat kuormitukset. Profiilit mitoitetaan sillä perusteella, että niiden tulee olla yhtä jäykkiä kuin nykyinen ovi lasin kanssa.

Mittaustulosten perusteella lasketaan jokaisen ovilehden teoreettinen neliömomentti lujuusopin palkkikaavojen avulla. Näin saadaan selville poikkipinnan neliömomentin arvo, mikä uudelta profiililta vähimmillään vaaditaan. Kuvan 15 alkuehdoilla kaavasta (12) seuraa

$$I_z(x) = \frac{Fx^2(L_{ovi}-x)^2}{3L_{ovi}Ev_{max}} \quad (13)$$

missä  $v_{max}$  on rungon suurin taipuma,  $x$  kuormituskohta ja  $E$  on materiaalin kimmoduuli. Kaavan (13) mukaan jokaiselle ovelle lasketaan poikkipinnan teoreettinen neliömomentti. Laskuissa otetaan huomioon alumiinirungon, jossa on lasi kiinnitettynä, suurin taipuma. Ulospäin kääntyvän suoran ovilehden tapauksessa otetaan huomioon taipuma ilman lasia, koska tätä ovea ei ollut saatavana lasillisena. Kolmipistetaivutuskokeen mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että oven kaarevuudella ei ole merkitystä jäykkyyteen, joten laskuissa käsitellään kaareva ovi suorana palkkina. Tulokset on esitetty taulukossa 11.

**Taulukko 11.** Testattujen ovien lasketut teoreettiset neliömomentit.

Ovi	Kuormitus (N)	Taipuma (mm)	Neliömomentti (mm <sup>4</sup> )
Ulospäin kääntyvä kaareva ovilehti	455	7,6	167973
Ulospäin kääntyvä ovilehti		4,6	190964
Sisäänpäin kääntyvä ovilehti		5,0	232644

Suurin vaikutus oven jäykkyyteen on ovilehden paksuudella, joten mitoitetään se vaatimusten mukaisesti. U-profiilin poikkileikkaukselle pätee yhtälö (Outinen ja Salmi 2004)

$$I_z = \frac{1}{12}b_{ovi}h^3 - \frac{1}{12}(b_{ovi} - b_{prof})h^3 - \frac{1}{6}(b_{prof} - t)(h - 2t)^3 \quad (14)$$

missä  $b_{ovi}$  on ovilehden leveys,  $h$  ovilehden paksuus,  $b_{prof}$  profiilin leveys,  $t$  seinämävahvuus,  $I_z$  poikkileikkaukselta vaadittava neliömomentti. Suorakaiteen muotoiselle profiilille pätee yhtälö

$$I_z = \frac{1}{12} b_{ovi} h^3 - \frac{1}{12} (b_{ovi} - b_{prof}) h^3 - \frac{1}{6} (b_{prof} - 2t) (h - 2t)^3. \quad (15)$$

Lasketaan kaavojen (14) ja (15) avulla vaadittava profiilin paksuus oville kahdella eri profiilin leveydellä. Profiilien leveydet ovat valittu tämän hetkisten alumiiniprofiilien mittojen pohjalta. Teräksisen U-profiilin tapauksessa vaadittava neliömomentti  $I_z$  on laskettu kaavalla (13) käyttäen teräksen kimmomoduulia. Materiaalin seinämävahvuus laskuissa on 3 mm. Tulokset on esitetty taulukossa 12.

**Taulukko 12.** Profiilien eri leveyksillä lasketut ovilehden paksuudet.

Ovi	Profiilin leveys (mm)	Profiilin paksuus (mm)		
		Alumiininen U-profiili	Teräksinen U-profiili	Alumiininen suorakaide profiili
Ulospäin kääntyvä kaareva ovi	45	36,7	23,3	35,4
Ulospäin kääntyvä ovi		38,8	24,6	37,4
Sisäänpäin kääntyvä ovi		42,3	26,8	40,6
Ulospäin kääntyvä kaareva ovi	60	32,6	20,7	31,9
Ulospäin kääntyvä ovi		34,5	21,9	33,7
Sisäänpäin kääntyvä ovi		37,6	23,8	36,6

Vaatimuslistan perusteella ovilehden paksuus saa olla suurimmillaan 40 mm ovikoneiston liitäntöjen ja yleisten tilavaatimusten perusteella. Ainoastaan sisäänpäin kääntyvässä ovesa 45 mm profiilin leveys ei käy alumiinia käytettäessä. Terästä käyttämällä päästään hyvinkin pieneen oven paksuuteen. Tulosten perusteella uudet profiilit on mahdollista mitoittaa vaatimusten mukaisesti siten, että pelkän rungon jäykkyys vastaa nykyisten lasillisten ovien jäykkyyttä.

## 5.6 Profiilien kiinnittäminen toisiinsa

Hitsiliitokset pyritään korvaamaan jollain muulla tavalla, koska vaatimukseen kuuluu hitsausten poistaminen. Tähän tarkoitukseen sopii ruuviliitos tai niittiliitos nopean asennuksen ja liitoksen jäykkyyden perusteella. Ruuviliitoksen etuna on asennuksen purku-



mahdollisuus ja luotettavuus. Niittiliitoksen etuna on asennuksen nopeus. Se ei myöskään löysty ja on kevyempi kuin ruuviliitos. (Airila et al. 1985, Airila et al. 1997)

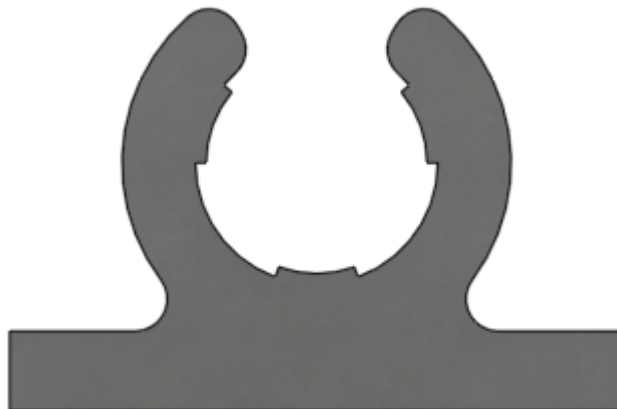
Liitos on mahdollista toteuttaa eri tavoin. Liitospalaa voidaan käyttää kulmissa, jonka avulla profiilit kiinnitetään toisiinsa. Liitospalaan on mahdollista koneistaa kierteet ruuveja varten. Onttoa kulmapalaa voidaan käyttää tilanteessa, missä käytetään niittiliitosta. Kuvassa 19 on esitetty liitospalan muoto.



**Kuva 19.** Liitospala profiilien kiinnittämiseen.

Liitospala on hyvä keino saada jäykkä ja kestävä liitos aikaiseksi ja sen asentaminen on nopeampaa kuin hitsaaminen. Liitospala kuitenkin lisää oven painoa ja kokoonpanoon tulee lisää vaiheita, joten virhemahdollisuudet kasvavat sen seurauksena.

Muotoilemalla ruuvitasku profiiliin on mahdollista pienentää liitoksen painoa ja vähentää koneistuksen tarvetta verrattuna liitospalaan. Näin ollen ruuvitasku on myös taloudellisempi vaihtoehto kuin liitospala. (Kinos et al. 1998) Kuvassa 20 on esitetty ruuvitaskun muoto.



**Kuva 20.** Ruuvitaskun muoto profiilissa.

Pursotustyökalun suunnittelussa voidaan ottaa huomioon millä tavoin ruuvit kiinnitetään ruuvitaskuun. Tavallista ruuvia käytettäessä taskuun täytyy koneistaa kierre. Käytettäessä kierteen muovaavia ruuveja tasku on mahdollista varustaa lukitsimilla, kuten kuvasta 20 nähdään. Tällöin ruuvi keskittyy ja se on helpompi kiristää. Samalla erikoistoleranssit voidaan jättää huomioimatta. (Kinos et al. 1998)

Ruuviliitos löystyy herkästi, jos siihen kohdistuu tärinää. Suuri tärinä aiheuttaa oven rakenteisiin väsyttävän kuormituksen (Hautero 2010). Tämä täytyy ottaa huomioon oikeanlaisella ruuviliitoksen suunnittelulla, jossa ruuvin aukikiertyminen pyritään estämään. Ruuviliitoksen aukeaminen voidaan estää oikealla esikiristyksellä, käyttämällä riittävän pitkää kierrepituutta ja lisäämällä kitkaa liitettävien osien välillä. Tässä tapauksessa esikiristuksen ja riittävän kierrepituuden ohella voidaan käyttää liimaa lukitsemaan kierteet toisiinsa. Lisäksi nykyään käytetyillä kierteen muovaavilla ruuveilla on mahdollista päästä hyvään kiinnipysyvyyteen tärinän alaisuudessa, kun noudatetaan ruuvin valmistajan suosittamia reiän halkaisijoita. (Airila et al. 1985)

## 5.7 Polykarbonaatin kiinnittäminen oven runkoon

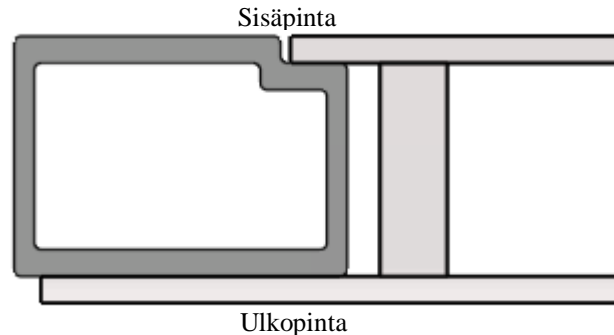
Polykarbonaatti on ominaisuuksiltaan erilainen kuin lasi ja se tulee ottaa huomioon kiinnitettäessä sitä runkoon. Polykarbonaatti vaatii E-hyväksynnän kelvataksaan ajoneuvorakenteisiin. Sen tulee olla siis kovapinnoitettua. Siitä johtuen polykarbonaattiin ei tartu tavanomaiset pinnoitteet tai liimat, jotka lasille sopivat. Tämä diplomityö tehdään yhteistyössä materiaalitekniikan diplomityön kanssa. Polykarbonaatin kiinnittäminen kuuluu materiaalitekniikan diplomityöhön, jossa tutkitaan tarkemmin polykarbonaatin kiinnitysmenetelmiä ja sille soveltuvia liimoja. (Nykänen 2009, Vink 2011)

Polykarbonaatin liimauksessa sen kovapinnoite tulee poistaa ennen liimausta. Muutoin liima ei pidä ja polykarbonaatti irtoaa rakenteesta (Muovimuotoilu 2012). Yksi iso ongelma tässä tapauksessa on lämpölaajeneminen. Lämmön vaihtelut vaikuttavat voimakkaammin PC-levyyn mitä oven runkoon. Lämpölaajeneminen tulee huomioida jo suunnitteluvaiheessa, kun otetaan huomioon oven laaja käyttölämpötila-alue ( $-40^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$ ). Liimauksessa tämä tarkoittaa sitä, että liimakerroksen paksuus tulee olla suurempi kuin lasilla (Sika Finland 2012). Tällöin liima pääsee liukumaan vapaammin eikä se leikkaannu irti niin herkästi.

Kiinnittämisessä on jonkin verran vaihtoehtoja riippuen käytetäänkö sitä yksi- vai kaksilevyisenä rakenteena. Yksilevyinen täytyy kiinnittää suoraan materiaaliin kiinni liimalla, ruuveilla tai niiteillä. Ruuvien ja niitten tapauksessa lämpölaajenemisen kompensointi täytyy jollain tavoin ottaa huomioon. Yhdistelmäkiinnitys on yksi mahdollinen ratkaisu tähän tilanteeseen. Tällöin voidaan käyttää liimaa ja ruuveja yhdessä kiinnitettäessä polykarbonaattia runkoon kiinni. Tässä tapauksessa täytyy ottaa huomioon välysten tarve PC-levyn porauksissa ruuviin nähden lämpöjännitysten tasaamiseksi. Yhdistelmäkiinnityksessä syntyy joka tapauksessa lämpöjännityksiä. Tämä täytyy ottaa mitoituksessa huomioon.

Kaksilevyistä rakennetta käytettäessä polykarbonaattilevyt on mahdollista kiinnittää toisiinsa jonkinlaisen ydinmateriaalin avulla. Ydinmateriaalin täytyy olla yhteensopiva polykarbonaatin kanssa lämpölaajenemisen takia. Tässä diplomityössä otetaan huomioon PC-hunajakenno ja PVC-vahto (Foiltek 2012). Rungon profiilit olisivat ikään kuin puristettuna levyjen väliin. Näin ollen liimaa rungon ja levyjen välissä ei tarvittaisi ollenkaan. Lämpölaajeneminen huomioitaisiin, kun levyt pääsisivät vapaasti laajenemaan

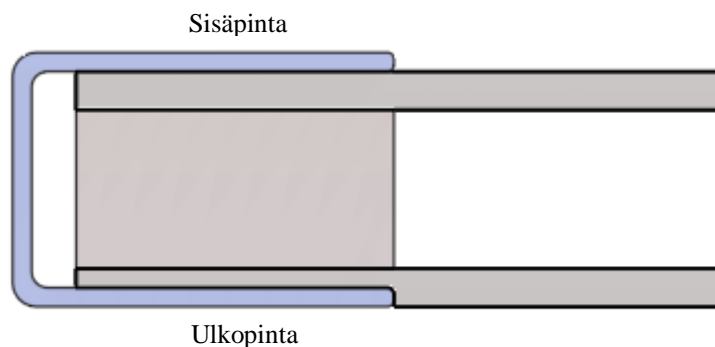
ja lämpöjännitysten syntyminen ehkäistäisiin tällä tavoin. Kaksilevyinen rakenne ja suo-  
rakaideprofiili sisälevyn profiilin syvennyksellä on esitetty kuvassa 21.



**Kuva 21.** Kaksilevyinen rakenne profiilin syvennyksellä.

Ydinmateriaalin ja rungon väliin täytyy jättää välys, jotta lämpölaajeneminen tulisi huomioitua. Ydinmateriaalin leveyttä rajoittaa vaatimus profiilin leveydelle ja näin ollen leikkausvoimat kasvavat liian suureksi levyjen ja ydinmateriaalin välillä. Rungon täytyy siis kantaa kaikki kuormitukset, koska polykarbonaattilevyt ydinmateriaalin kanssa eivät tue rakennetta juuri lainkaan.

Eräs vaihtoehto levyjen kiinnittämiseen on se, että käytetään runkorakenteessa U-profiilia ja puristetaan se levyjen ja ydinmateriaalin päälle. Tällä tavalla voitaisiin käyttää leveämpää ydinmateriaalia, joten leveydelementti voi kantaa osan kuormasta. U-profiilin käyttöä rajoittaa vaatimus sileästä ulkopinnasta. Tämän vuoksi levyt täytyisi jyrsiä siten, että oven ulkopinnasta tulisi sileä kuvan 22 tapaan.



**Kuva 22.** Jyrsitty polykarbonaattielementti U-profiilin kanssa.

Polykarbonaatin työstäminen jyrsimällä aiheuttaa lisävaiheita esivalmisteluun. Lisäksi se lisää levyn paksuutta, jotta levy voidaan edes jyrsiä U-profiilin seinämävahvuuden mukaan. Jyrsiminen aiheuttaa myös profiilin sisäreunaan kohdan, johon muodostuu helposti jännityshuippuja. Tämä voidaan kompensoida viisteen avulla, jotta jännityshuiput saadaan poistettua.

## 5.8 Toimilaitteiden kiinnittäminen

Nykyisissä ovissa on käytetty ruuviliitoksia toimilaitteiden kiinnittämiseen. Tässä diplomityössä on havaittu, että oven rungon tulee kantaa lähes kaikki oveen kohdistuvat kuormitukset. Tästä johtuen toimilaitteet ja muut varusteet on mahdollista kiinnittää ruuviliitoksin tai niittiliitoksin oven runkoon kiinni.

Toimilaitteiden liittämiseksi oven runkoon täytyy tehdä poraukset, joihin ne ja muut varusteet kiinnitetään. Kiinnittäminen on hyvin samankaltainen verrattuna nykyiseen oveen, joten samaa menetelmää on paras käyttää uuden ovirakenteen kanssa. Tällöin ei välttämättä tarvitse suunnitella uutta kiinnitysmenetelmää niittiliitoksilla.

## 5.9 Ratkaisumuunnelmien pistearviointi

Tässä kappaleessa muodostetaan morfologisen matriisin osatoimintojen toteutustavoista erilaisia ratkaisumuunnelmia. Tämän jälkeen muodostetaan painotetut arviointikriteerit, jonka jälkeen suoritetaan pistearviointi eri ratkaisumuunnelmille. Tuloksista nähdään mitkä ratkaisumuunnelmat ovat parhaita uudeksi ovirakenteeksi. (Pahl & Beitz 1992)

Ratkaisumuunnelmissa otetaan huomioon kaikki vartenotettavat ratkaisut uudeksi ovirakenteeksi. Tämä tehdään siksi, että saadaan mahdollisimman paljon toteuttamiskelpoisia vaihtoehtoja ja että ettei hylätä mitään tämän diplomityön kannalta edullista ratkaisua. (Pahl & Beitz 1992) Erilaisia ratkaisumuunnelmia kehitellään sopiva määrä ja ne on esitetty taulukossa 13.

**Taulukko 13.** Ratkaisumuunnelmat uudeksi ovirakenteeksi.

<b>Ratkaisumuunnelma</b>	<b>Profiilivaihtoehdot</b>	<b>Profilien kiinnittäminen toisiinsa</b>	<b>Polykarbonaatin kiinnittäminen oven runkoon</b>	<b>Toimilaitteiden kiinnittäminen</b>
1	Alumiininen U-profiili	Ruuviliitos	Mekaaninen liitos	Ruuviliitos
2	Alumiininen U-profiili	Niittiliitos	Niittiliitos	Niittiliitos
3	Teräksinen U-profiili	Ruuviliitos	Mekaaninen liitos	Ruuviliitos
4	Teräksinen U-profiili	Niittiliitos	Niittiliitos	Niittiliitos
5	Alumiininen suorakaideprofiili	Ruuviliitos	Mekaaninen liitos	Ruuviliitos

Ratkaisumuunnelma	Profiilivaihtoehdot	Profiilien kiinnittäminen toisiinsa	Polykarbonaatin kiinnittäminen oven runkoon	Toimilaitteiden kiinnittäminen
6	Alumiininen suorakaideprofiili	Niittiliitos	Liimaus	Niittiliitos
7	Alumiininen suorakaideprofiili	Niittiliitos	Niittiliitos	Niittiliitos

Ratkaisumuunnelmia on mahdollista kehittää lähes rajaton määrä. Tästä syystä edellä olevat muunnelmat on esitetty osatoimintojen samankaltaisuuden ja kokonaisuuden toteuttamiskelpoisuuden vuoksi. Tämän diplomityön kannalta oleelliset ratkaisumuunnelmat ovat 1, 3 ja 5, joten ainoastaan ne otetaan huomioon jatkossa.

Seuraavaksi muodostetaan arviointikriteerit ja niiden painokertoimet, joiden perusteella arvioidaan ratkaisumuunnelmia. Arviointikriteerit saadaan vaatimuslistaa soveltamalla. Pistearvioinnissa käytetään kriteerejä, mitkä parhaiten palvelevat kokonaisuutta. Vaatimukset materiaalien esivalmisteluista, kokoonpanon nopeudesta ja lopputuloksen toimivuudesta otetaan huomioon ja näiden perusteella muodostetaan arviointikriteerit.

Materiaalien esivalmisteluissa otetaan huomioon esivalmistelujen vaikeus ja niiden tarve. Porauksiin, taivutuksiin ja leikkauksiin menevää aikaa on myös arvioitava. Lisäksi arvioidaan virhemahdollisuuksien todennäköisyyttä. Olennaista tässä diplomityössä on tuotannon läpimenoajan lyhentäminen, joten kokoonpanon nopeutta ja työvaiheiden määrää on arvioitava. Lopputuloksen toimivuuteen otetaan mukaan oven toimivuus sen käyttöolosuhteissa sekä oven ulkonäölliset seikat. (Pahl & Beitz 1992) Arviointikriteerit ja niiden painokertoimet on esitetty taulukossa 14.

**Taulukko 14.** Arviointikriteerit ja niiden painokertoimet.

Arviointikriteeri	Painokerroin
Esivalmistelujen tarve	0,15
Vähiten virhemahdollisuuksia valmistuksessa	0,20
Kokoonpanon nopeus	0,25
Työvaiheiden määrä	0,10
Oven toimivuus käyttöolosuhteissa	0,20
Sileä ulkopinta	0,10

Arviointikriteerien perusteella annetaan valituille ratkaisumuunnelmille pisteitä 0-4. Pisteistä 0 on huonoin ja 4 paras. Jokaiselle ratkaisumuunnelmalle annetaan pisteet kriteerien mukaan ja kerrotaan painokertoimella jolloin saadaan painotettu osa-arvo arviointikriteeriä kohden. Painotetut osa-arvot summataan yhteen, jolloin saadaan jokaista

muunnelmaa kohden laskettua kokonaisarvo. Tämän perusteella nähdään mikä ratkaisumuunnelmista on paras. (Pahl & Beitz 1992)

Pistearviointi suoritetaan ratkaisumuunnelmille. Pisteet annetaan ja lasketaan painotetut osa-arvot ja kokonaisarvot. Tulokset on esitetty taulukossa 15.

**Taulukko 15.** Ratkaisumuunnelmien pistearviointi.

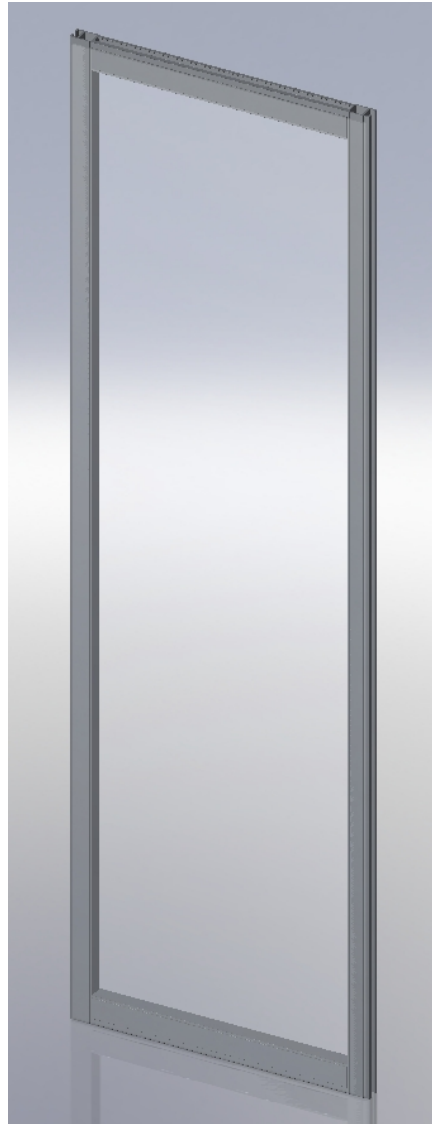
Ratkaisumuunnelma 1			
Arviointikriteeri	Painokerroin	Pistemäärä	Painotettu osa-arvo
Esivalmistelujen tarve	0,15	2	0,3
Vähiten virhemahdollisuuksia valmistuksessa	0,20	2	0,4
Kokoonpanon nopeus	0,25	2	0,5
Työvaiheiden määrä	0,10	2	0,2
Oven toimivuus käyttöolosuhteissa	0,20	3	0,6
Sileä ulkopinta	0,10	1	0,1
Kokonaisarvo		2,1	
Ratkaisumuunnelma 3			
Arviointikriteeri	Painokerroin	Pistemäärä	Painotettu osa-arvo
Esivalmistelujen tarve	0,15	1	0,15
Vähiten virhemahdollisuuksia valmistuksessa	0,20	2	0,4
Kokoonpanon nopeus	0,25	2	0,5
Työvaiheiden määrä	0,10	2	0,2
Oven toimivuus käyttöolosuhteissa	0,20	2	0,4
Sileä ulkopinta	0,10	1	0,1

Kokonaisarvo		1,75	
Ratkaisumuunnelma 5			
Arviointikriteeri	Painokerroin	Pistemäärä	Painotettu osa-arvo
Esivalmistelujen tarve	0,15	3	0,45
Vähiten virhemahdollisuuksia valmistuksessa	0,20	3	0,6
Kokoonpanon nopeus	0,25	3	0,75
Työvaiheiden määrä	0,10	3	0,3
Oven toimivuus käyttöolosuhteissa	0,20	3	0,6
Sileä ulkopinta	0,10	3	0,3
Kokonaisarvo		3	

Pistearvioinnin perusteella nähdään, että paras ovi kokonaisuuden kannalta on ratkaisumuunnelma 5, jossa käytetään alumiinista suorakaideprofiilia. Siinä profiilit kiinnitetään ruuviliitoksin ja polykarbonaatti mekaanisella liitoksella, jolloin lämpölaajeneminen otetaan huomioon. Toimilaitteet liitetään ruuviliitoksilla samaan tapaan kuin nykyisissä ovissa. Huonoin on teräksisellä U-profiililla varustettu ovi ja alumiinisella U-profiililla varustettu ovi on vain hieman parempi. Tämän diplomityön kannalta on hyödyllistä kuitenkin ottaa kaikki kolme ratkaisumuunnelmaa tarkempaan kehittelyyn. Tästä johtuen erityyppisiä rakenteita on mahdollista vertailla keskenään. Uuden ovirakenteen valinnassa voidaan kuitenkin käyttää hyväksi pistearvioinnin tulosta.

## 6. OVIRAKENNEVAIHTOEHTOJA

Uuden oven rakennevaihtoehtoiksi on valittu kolme erilaista kehitelmää. Ovet kehitellään yhden testatun ovimallin pohjalle. Laskettujen profiilin paksuuksien perusteella voidaan sanoa, että testatuista ovista heikoin rakenne on sisäänpäin kääntyvässä ovesta. Uudet ovet kehitellään tämän pohjalta, koska sen rakenne on haasteellisin jäykkyyden osalta. Sisäänpäin kääntyvän oven pohjalta on myös helpoin aloittaa uuden oven kehittäminen, koska se on rakenteeltaan yksinkertaisin. Lisäksi oven poikkileikkaus on samanlainen lähes koko pituutensa matkalta. Kuvassa 23 esitellään jatkokehityksen pohjaksi valittu ovi.



**Kuva 23.** Jatkokehityksen pohjaksi valittu sisäänpäin kääntyvä suora ovilehti.



## 6.1 Alumiininen U-profiili

Oven kehittelyyn on valittu erääksi mahdolliseksi vaihtoehdoksi alumiinisella U-profiililla varustettu ovi. Lasina käytetään polykarbonaattielementtiä yksi- tai kaksilevyisenä. PC-levyjen välissä käytetään jotain soveltuvaa ydinmateriaalia, mitä tutkitaan materiaalitekniikan diplomityössä.

Uuden oven rakenne kehitellään sisäänpäin kääntyvän ovilehden korvaajaksi. U-profiilissa on helpoin käyttää liitospalaa kulmissa. Profiilit leikataan sopivaan kulmaan ja kiinnitetään ruuviliitoksin. Niittausta on suositeltu käytettäväksi leikkausvoimien kantamiseen (Airila et al. 1985), joten ulkonäöllisistä syistä ruuviliitokset valitaan profiilin reunoihin ruuvinkannan upotuksella siten, että ne jäävät piiloon liimateipillä kiinnitettävien kumitiivisteiden alle. Profiilit mitoitetaan laskujen perusteella. Poikkileikkaus on esitetty kuvassa 24.



**Kuva 24.** Alumiinisen U-profiilin poikkileikkaus.

Profiilin leveys, paksuus ja seinämävahvuus päätetään alumiiniselle U-profiilille. Tärkeimmät poikkileikkauksen mitat on esitetty taulukossa 16.

**Taulukko 16.** Alumiinisen U-profiilin poikkileikkauksen ominaisuudet.

Profiilin leveys	60 mm
Profiilin korkeus	40 mm
Profiilin seinämävahvuus	3 mm
Paino/pituus	1,236 kg/m

Tässä ovesta vahvuuksia ovat keveys yhdistettynä jäykkyyteen ja kokoamisen nopeus ruuviliitosten avulla. Toisaalta ovi ei välttämättä ole kiertojäykkyyden ja nurjahamisvaaran osalta tarpeeksi hyvä avonaisen profiilin osalta. U-profiilia käyttäessä polykarbonaatin ja ydinmateriaalin liimaukseen ei tarvitse kiinnittää niin suurta huomiota. Profiili muodostaa mekaanisen varmistuksen sillä, jos liima pettää niin levyt eivät tipu ovesta. Lämpölaajenemisen kompensointi on mahdollista mitoittamalla vällys profiilin sisään PC-elementin ja rungon reunojen väliin. Levyelementti pääsee näin ollen vapaasti liikkumaan rungon sisällä lämpötilan vaihdellessa. Lisävaiheita kokoonpanon esivalmisteluihin tulee polykarbonaatin työstämisestä, koska se täytyy jyrsiä sileän ulkopinnan aikaansaamiseksi. Kuvassa 25 on esitetty alumiinisella U-profiililla varustettu ovi.



**Kuva 25.** Ovirakennevaihtoehto alumiinisella U-profiililla.

Valmistusteknisesti alumiininen profiili on mahdollista pursottaa muotoonsa. Avonainen profiili on helpompi pursottaa kuin umpinainen, joten profiilin työkalukustannukset ovat pienemmät. Ongelmakohta profiilin työstämisessä on leikkaaminen sopivaan kulmaan, sillä sauma jää näkyviin oven ulkoreunaan. Lopputulos ei välttämättä ole niin sileä ulkopinta kuin ovelta vaaditaan. Avoimen profiilin taittaminen kaarevaksi on vaikeampaa kuin suljetun, joten tämänkaltainen rakenne on parhaimmillaan suorana. Liitospalan työstämisessä ja ruuvikierteen koneistamisessa menee oma aikansa ja tämä lisää työvaiheita ja oven painoa jonkin verran.

## 6.2 Teräksinen U-profiili

Teräs materiaalina ei välttämättä ole kaikkein soveltuvin tämänkaltaiseen sovellukseen, mutta vertailun vuoksi se otettiin mukaan tämän diplomityön ovirakenteeksi. Teräksisellä U-profiililla on mahdollisuus päästä ohueen kokonaisuuteen menettämättä silti jäykkyyttä.

Ovi on rakenteeltaan samanlainen kuin edellinen ovirakenne. Oven kulmissa käytetään liitospalaa, jonka avulla profiilit kiinnitetään toisiinsa ruuviliitosten avulla. Teräsprofiileissa käytetään ruuvinkannan upotusta siistimmän lopputuloksen aikaansaamiseksi. Reunoissa kumitiivisteet kiinnitetään liimateipillä. Teräksinen ovi on ohuempi ja siinä on pienempi seinämävahvuus kuin alumiinissa. Teräsprofiilin poikkileikkaus on esitetty kuvassa 26.



**Kuva 26.** Teräksinen U-profiili.

Profiili mitoitetaan laskujen perusteella ja tärkeimmät mitat on esitetty taulukossa 17.

**Taulukko 17.** Teräksisen U-profiilin poikkileikkauksen ominaisuudet.

Profiilin leveys	45 mm
Profiilin korkeus	30 mm
Profiilin seinämävahvuus	2 mm
Paino/pituus	1,815 kg/m

Tämänkaltaista ovirakennetta voidaan käyttää yhdellä tai kahdella polykarbonaatti-levyllä. PC-levyjen välissä käytetään soveltuvaa ydinmateriaalia. Levyt täytyy työstää jyrsimällä, jotta saadaan sileä ulkopinta. Lämpölaajeneminen kompensoituu samoin kuin alumiinisen U-profiilin tapauksessa. Profiilin sisään mitoitetaan vällys polykarbonaatti-levyjen ja reunan väliin, jotta levyelementti pääsee vapaasti liikkumaan rungon sisällä. Kuvassa 27 on esitetty ovi teräsprofiililla.



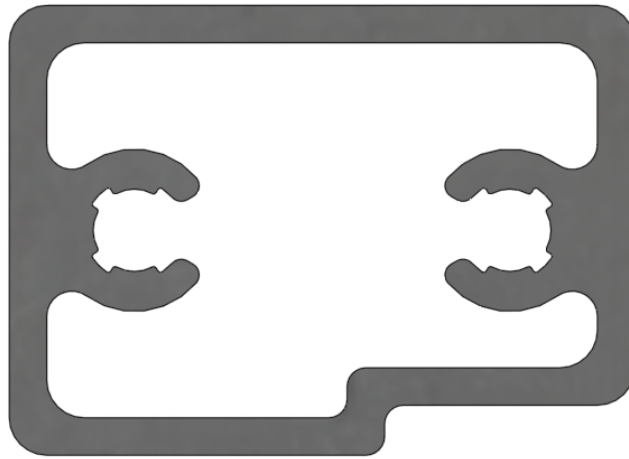
**Kuva 27.** Ovirakennevaihtoehto teräksisellä U-profiililla.

Teräsprofiilin ongelmana on nurjahduksen estäminen, koska oven lujuus-paino suhteen vuoksi seinämävahvuus täytyy optimoida. Ovimateriaalina teräs on kohtalaisen tuntematon verrattuna alumiiniin ja sen vuoksi sen valmistamisessa ja työstämisessä on haasteita. Tässä tapauksessa avoimen poikkileikkauksen työstämisen ja esivalmistelun ongelmat ovat samat riippumatta siitä käytetäänkö terästä vai alumiinia. Kaarevat muodot ovat hankalia, joten tämänkaltainen ovirakenne toimii parhaiten suorana. Lisätyötä teettää kulmapalojen työstäminen ja ruuvireikien poraaminen ja kierteitys.

### 6.3 Alumiininen suorakaideprofiili ruuvitaskuilla

Alumiininen suorakaideprofiili oven runkona on valittu yhdeksi jatkokehityksen vaihtoehdoksi. Tällainen profiili on hyvä vaihtoehto rungon pääasialliseksi jäykisteeksi, koska se on kaikkein tutuin profiilityyppi tämänkaltaisissa sovelluksissa. Siinä on parempi kiertojäykkyys verrattuna avoimeen U-profiiliin.

Ovi kehitellään tämän perusteella. Profiili varustetaan kahdella ruuvitaskulla, joiden avulla profiilit kiinnitetään toisiinsa. Profiiliin jätetään syvennys sisälasin kiinnittämistä varten. Yhdellä polykarbonaattilevyllä varustettu ovi kannattaa toteuttaa siten, että levy liimataan runkoon kiinni soveltuvalla liimalla. Kahden PC-levyn tapauksessa levyt kiinnitetään toisiinsa ydinmateriaalin avulla ja rungon profiilit puristetaan levyjen väliin. Suorakaideprofiilin poikkileikkaus on esitetty kuvassa 28.



**Kuva 28.** Alumiiniprofiili kahdella lukitsimin varustetulla ruuvitaskulla.

Alumiiniprofiili mitoitetaan laskujen perusteella ja tärkeimmät mitat on esitetty taulukossa 18.

**Taulukko 18.** Alumiiniprofiilin poikkileikkauksen ominaisuudet.

Profiilin leveys	50 mm
Profiilin korkeus	36 mm
Profiilin seinämävahvuus	3 mm
Paino/pituus	1,778 kg/m

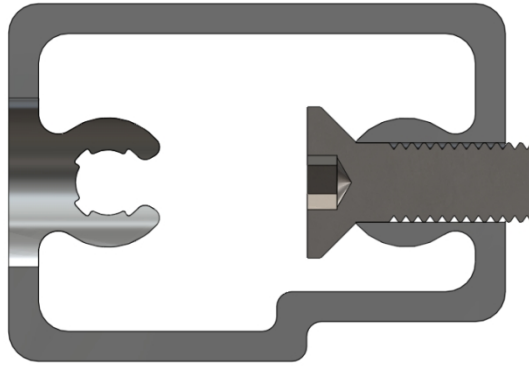
Tällainen suljettu profiili on hankalin pursottaa ja se vaatii monimutkaisen työkalun. Näin ollen profiili tulee kalliimmaksi kuin avoimet U-profiilit. Suorakaideprofiili vaatii kuitenkin vähiten esivalmisteluja, koska niiden reunoja ei tarvitse leikata kulmaan vaan profiilit kiinnitetään sellaisenaan. Ylimääräisiä kiinnityspaloja ei kulmissa tarvita, joten työvaiheita ei ole niin montaa. Lisäksi vältetään kulmapalojen koneistaminen ja ruuvi-

reikien poraus ja kierteitys. Kuvassa 29 on esitetty kehitelmä ovesta, jossa on suorakaideprofiilit.



**Kuva 29.** Ovirakennevaihtoehto alumiinisella suorakaideprofiililla.

Profiilien kiinnityksessä tarvitaan vain yhden tai kahden kokoista porausta ruuveja varten riippuen siitä kiinnitetäänkö ruuvit reunaprofiilin ulkoreunaan vai sisäreunaan. Tässä tapauksessa käytetään kahta porausta ja ruuvit kiinnitetään profiilin sisäpintaan. Tällainen kiinnitys on parempi, koska siinä ei tarvita pitkiä ruuveja ja toisaalta reunaan ei tarvitse tehdä ruuvinkannan upotusta. Porausreiät jäävät siististi liimateipillä kiinnitettävien tiivisteiden alle. Kuvassa 30 on esitetty ruvin kiinnittäminen profiiliin.



**Kuva 30.** Ruuvin kiinnitys profiilin sisäpintaan.

Suljetun alumiiniprofiilin työstäminen on helpompaa, koska taivuttamisessa ei ole niin suurta riskiä lommahdukselle kuin avonaisella profiililla. Oven rakenne on kiertojäykempi kuin U-profiileilla. Lisäksi, jos ruuviliitos suunnitellaan oikein, saadaan luja ja väsyttävää kuormitusta kestävä liitos. Kiinnityksessä käytetään kierteen muovaavaa ruuvia. Näin ollen ruuvitaskuja ei tarvitse kierteittää, ruuvit keskittyvät itsestään ja kiristäminen on nopeaa.

## 7. OVIRAKENTEIDEN VERTAILU

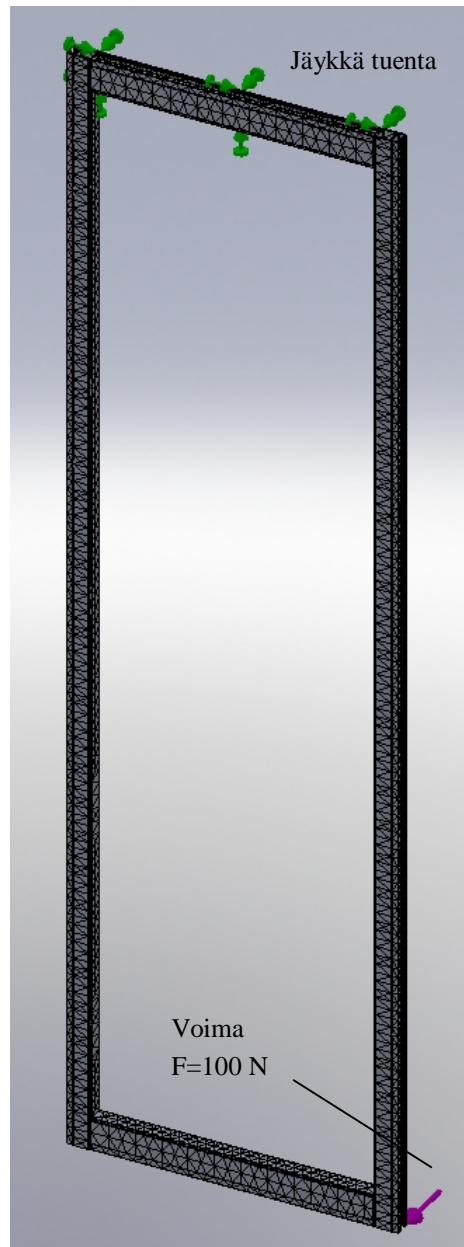
Tässä luvussa vertaillaan kehiteltyjä ovirakenteita nykyisen oven kanssa. Tämän jälkeen nähdään ovatko kehitellyt rakenteet mahdollisia tai järkeviä toteuttaa ja onko niistä tämän hetkisen oven korvaajaksi. Oven rakenne on monimutkainen ja epämääräinen, joten analyttisen tarkastelun tekeminen on mahdotonta ja työlästä. Rakennetta testataan FEM-laskennan avulla, jotta nähdään miten oven rakenne käyttäytyy kuormituksen alaisena kriittisimmässä tilanteessa oven käyttöä ajatellen. FEM-laskentaan käytetään Solid Works Simulation ohjelmistoa. (SolidWorks 2010)

Sisäänpäin kääntyvä ovi on tuettuna ovilehden yläreunasta ja sen kriittisin kohta aukeamisen suhteen on oven alareuna ovilehtien aukeamiskohdassa. Tämän perusteella saadaan reunaehdot tuennalle ja kuormituksen kohdalle. FEM-laskenta suoritetaan jokaiselle ovelle. Tavoitteena on siis testata rungon kiertojäykkyyttä FEM-laskennan avulla. Sen perusteella tehdään päätökset, mikä ovirakennevaihtoehto olisi paras korvaamaan nykyinen sisäänpäin kääntyvä ovi.

### 7.1 Jatkokehitykseen valitun oven analysointi

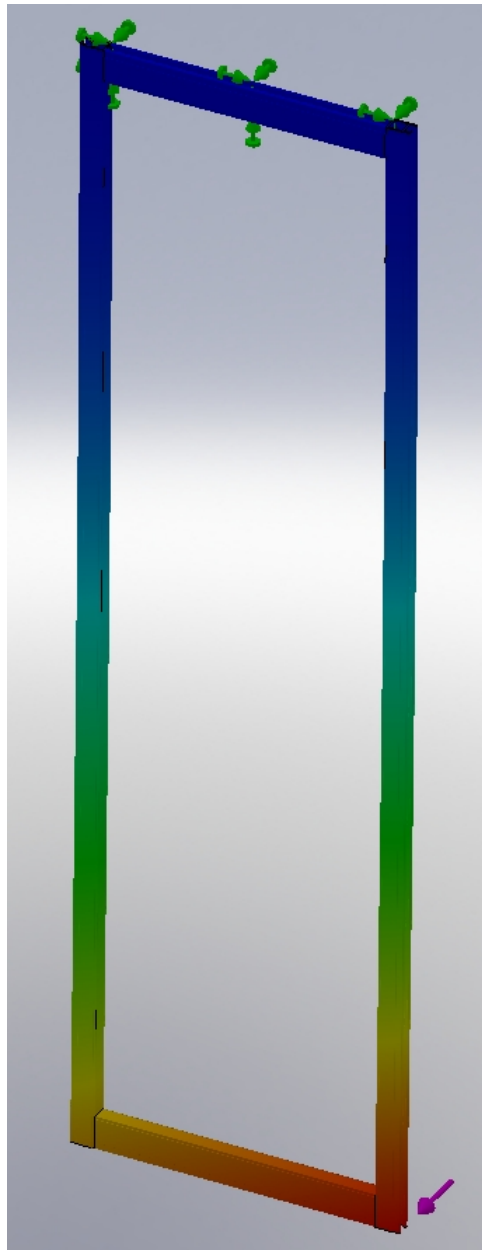
FEM-laskennan avulla lasketaan sisäänpäin kääntyvän oven taipuma kuormituskohdassa. Lasia ei oteta laskussa huomioon, koska liiman analysointi laskennan avulla on hankalaa ja jäykkä liitos lasin ja rungon välissä antaa epätarkkoja tuloksia. Oven käyttökoneisto jätetään myös laskennasta pois. Laskennan reunaehdot ovat jäykkä tuenta ovilehden yläreunasta ja kuormitus oven alareunassa. Jäykkä tuenta asetetaan ovilehden yläprofiilin sisäreunalle ja sen avulla mallinnetaan todellisen oven tuenta ovilehden yläreunasta. Kuormituksena käytetään voimaa, jonka suuruudeksi on määritelty 100 N. Kuormituskohda on oven alareunasta kohtisuoraan ovesta ulospäin. FEM-laskennan avulla mallinnetaan ovilehden aukeamista kriittisimmästä kohdasta. Kuvassa 31 on esitetty FEM-laskennan tilanne elementtiverkon, tuennan ja kuormituksen kanssa.





**Kuva 31.** FEM-laskennan reunaehdot sisäänpäin kääntyvälle ovelle.

Laskentaa varten on muodostettu tiheä elementtiverkko kiinteistä elementeistä. Violetti nuoli esittää kuormituskohdan ja voiman suunnan. Vihreillä nuolilla on esitetty jäykkä tuenta. Laskennan tuloksena saadaan taipuma oven alareunasta. Kuvassa 32 on esitetty FEM-laskennan lopputulos, josta nähdään ovilehden muodonmuutos kuormituksen alaisena.



**Kuva 32.** FEM-laskennan tulos sisäänpäin kääntyvälle ovelle.

Kuvassa sininen väri osoittaa pientä muodonmuutosta ja punainen suurta. Muodonmuutos on kuvattu luonnollisena suhteessa ovilehden mittoihin. Laskennan perusteella rungon suurin taipuma on kuormituskohdassa ja sen suuruudeksi saadaan voimalla 100 N

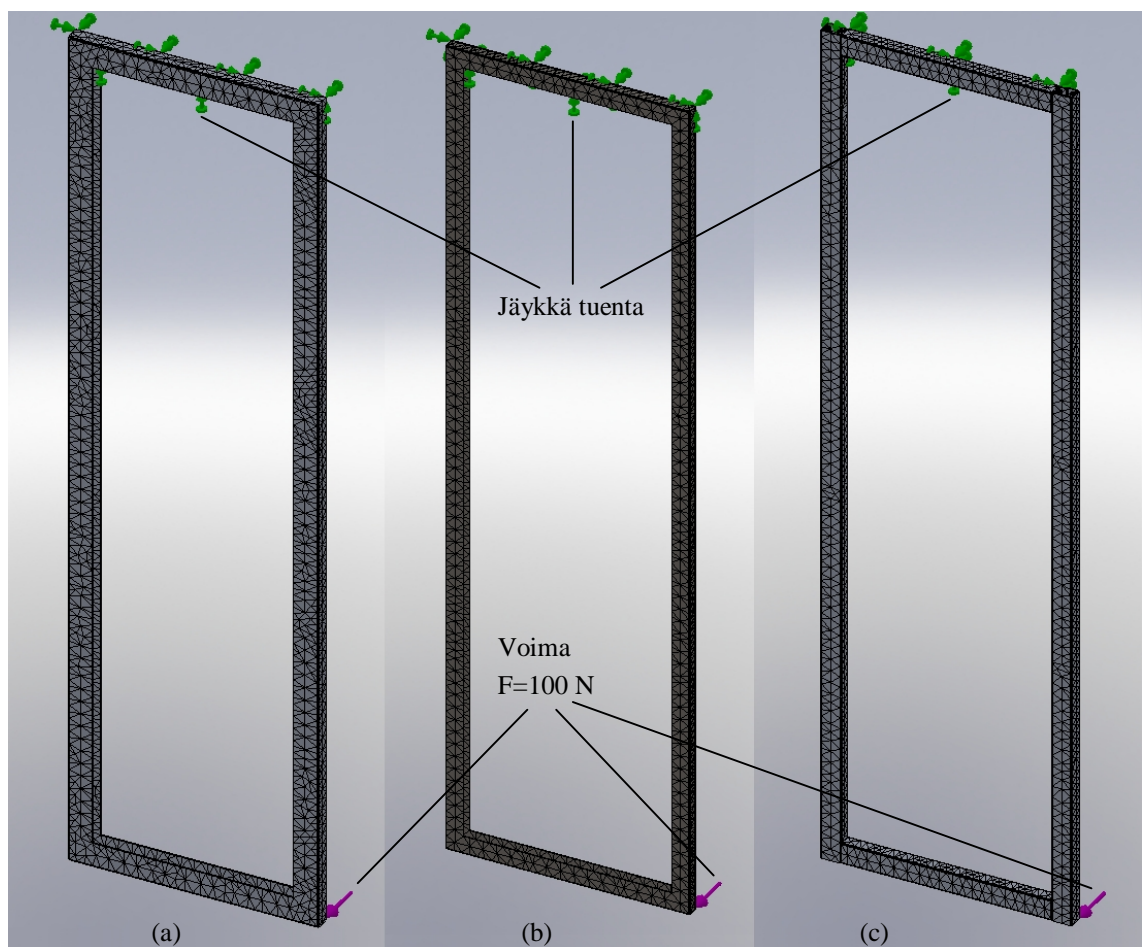
$$v_{FEM} \approx 38,6 \text{ mm}$$

missä  $v_{FEM}$  on FEM-laskennalla saatu taipuman arvo. Tätä tulosta käytetään pohjana verrattaessa nykyistä ovirakennetta uusiin ovirakenteisiin.

## 7.2 Uusien ovirakenteiden analysointi

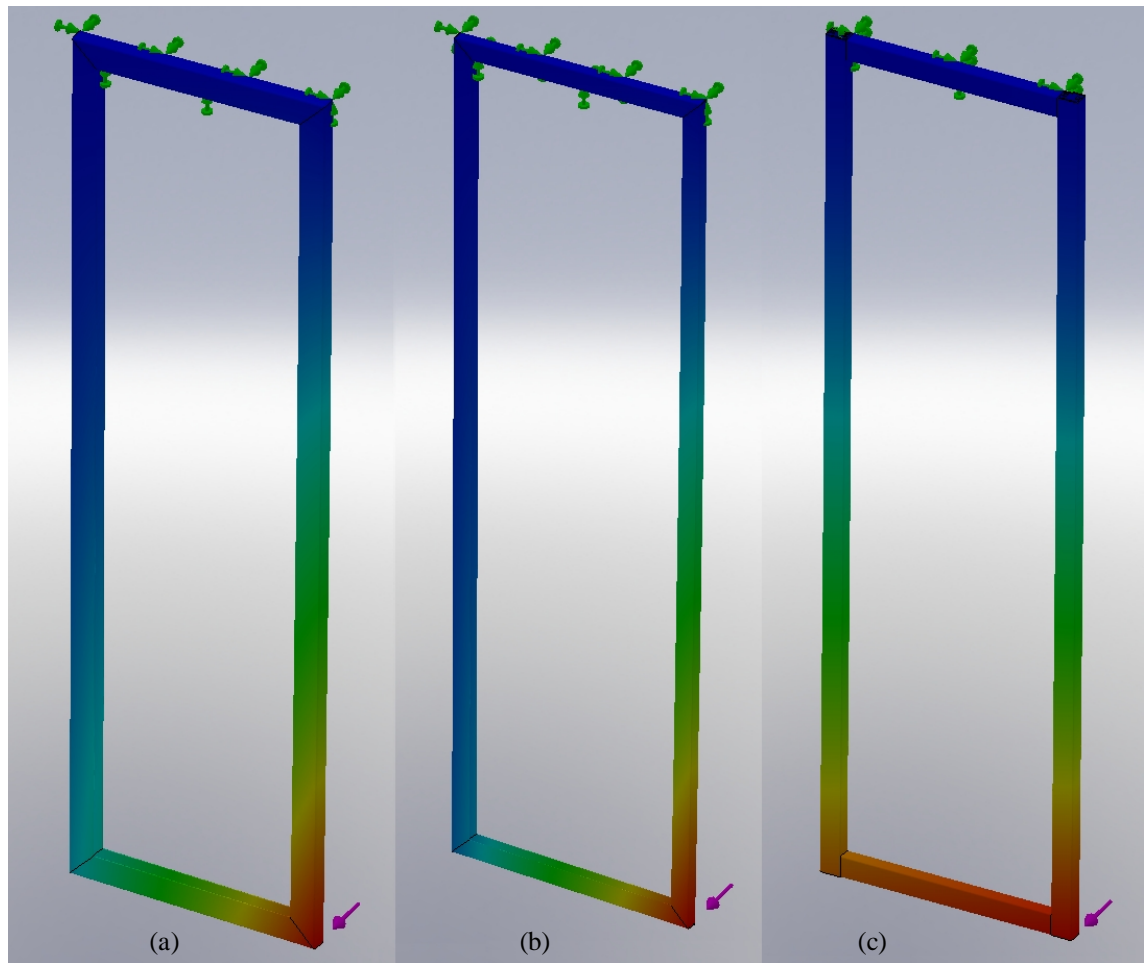
FEM-laskenta suoritetaan samoilla reunaehdoilla uusille kehitellyille ovirakenteille. Edellä on suoritettu FEM-laskenta ainoastaan nykyisen oven rungolle, joten tässäkin kohdassa jätetään polykarbonaattilevyt laskuissa huomioimatta. Taipuman tuloksia verrataan nykyiseen sisäänpäin kääntyvän oven tuloksiin.

Reunaehtoihin kuuluu jäykkä tuenta oven yläprofiilin sisäreunassa oven sisäpuolelta. Tämän avulla mallinnetaan todellisen oven tuentaa oven yläreunasta. Kuormituksena käytetään voimaa, jonka suuruudeksi on määritelty 100 N. Kuormituskohta on oven alareunassa ja suunta kohtisuoraan ovesta ulospäin. Uusien ovirakenteiden reunaehdot ja elementtiverkko FEM-laskentaan on esitetty kuvassa 33.



**Kuva 33.** FEM-laskennan reunaehdot alumiiniselle U-profiilille (a), teräksiselle U-profiilille (b) ja alumiiniselle suorakaideprofiilille (c).

Elementtiverkko muodostuu kiinteistä elementeistä. Vihreät nuolet ilmaisevat jäykän tuennan ja violetit nuolet kuormituskohdan ja voiman suunnan. Laskennassa on jätetty huomioimatta poraukset, liitospalat ja ruuvit. FEM-laskennassa testataan ainoastaan rakenteen toimivuutta. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 34, josta nähdään ovirakenteen muodonmuutos kuormituksen alaisena.



**Kuva 34.** FEM-laskennan tulos alumiiniselle U-profiilille (a), teräksiselle U-profiilille (b) ja alumiiniselle suorakaideprofiilille (c).

Muodonmuutoksen mittakaava on esitetty luonnollisessa koossa suhteessa oven mitoihin. Sininen väri ilmaisee pientä muodonmuutosta ja punainen suurta. Uusien ovirakenteiden taipuman suuruus FEM-laskennan perusteella kuormituskohdassa on esitetty taulukossa 19, kun voiman suuruus on 100 N.

**Taulukko 19.** Uusien ovirakenteiden taipumat FEM-laskennan perusteella.

Ovi	$v_{FEM}(\text{mm})$
Alumiininen U-profiili	47,8
Teräksinen U-profiili	57,7
Alumiininen suorakaideprofiili	29,3

Laskuissa ei oteta huomioon profiilien välisiä liitoksia. Liitoksien kestävyyttä on vaikea arvioida tai laskea ja ne vaativat tarkempaa tarkastelua todellisilla rakenteilla. FEM-laskennan perusteella arvioidaan pelkästään ovirakenteiden toimivuutta kiertojäykkyyden suhteen.

### 7.3 Ovien rakenteiden vertaaminen

Tässä luvussa verrataan nykyistä ovirakennetta uusiin ovirakenteisiin. Vertaamalla ovi-lehtien painoa ja jäykkyyttä toisiinsa nähdään, missä ovelle on paras rakenne. Lisäksi vaatimuslistan perusteella voidaan nähdä ne kohdat, jotka toteutuvat. Edellä on laskettu lujuusopin palkkikaavojen mukaan profiilin ulkomitat kolmipistetaivutuskokeen tulosten pohjalta. Niiden perusteella mitoitettiin kolme erilaista uuden tyyppistä profiilia, joista joku valitaan mahdollisesti korvaamaan nykyinen sisäänpäin kääntyvä ovi.

Oven rakenne on kuitenkin niin monimutkainen, että sen tarkastelu analyttisesti on työlästä ja hankalaa. Oven rakennetta tarkasteltiin FEM-laskennan avulla, jotta voidaan valita sopivin ratkaisu jatkokehitykseen. Laskennassa jätettiin profiilin liitokset huomiotta ja testattiin vain rakenteen toimivuutta. Nykyisen ja uusien ovien massat ja FEM-laskennan perusteella saadut taipuman arvot on esitetty taulukossa 20.

**Taulukko 20.** Ovien rakenteiden ominaisuudet FEM-laskennan perusteella.

Ovi	Rungon massa (kg)	$v_{FEM}$ (mm)
Sisäänpäin kääntyvä ovi	6,7	38,6
Alumiininen U-profiili	6,3	47,8
Teräksinen U-profiili	8,7	57,7
Alumiininen suorakaideprofiili	9,0	29,3

Vaatimuslistan perusteella rungolta vaaditaan samaa jäykkyyttä nykyisen oven kanssa, joten tässä vaiheessa voidaan sulkea avoimet poikkileikkaukset pois. Tätä tukee myös pistearviointi, jonka perusteella alumiinisella suorakaideprofiililla varustettu ovi on paras. Suorakaideprofiili on jäykin laskennan perusteella. Siinä on poikkileikkauksen leveys ja korkeus suuremmat reunaprofiileissa verrattuna nykyisen oven profiilin mittoihin. Samaa materiaalia käytettäessä uusi profiili on jäykempi. Sisäänpäin kääntyvän oven runkoon verrattuna saadaan rakenteellista jäykkyyttä parannettua käyttämällä alumiinista suorakaideprofiilia varustettuina ruuvitaskuin. Laskennassa ei voida ottaa huomioon lasin tai polykarbonaatin jäykkyyttä, koska liiman käyttäytymistä on vaikea mallintaa ja se riippuu ajasta.

Suorakaideprofiiliovelle polykarbonaattilevyt kiinnitetään ydinmateriaalin avulla toisiinsa ja profiilit puristetaan levyjen väliin. Ydinmateriaalin ja profiilin reunojen väliin täytyy jättää välys, jotta lämpötilan vaihtelut eivät aiheuta lämpöjännityksiä. Siksi ovea ei voida kiinnittää jäykästi runkoon. Tämän takia polykarbonaattilevyt eivät jäykistä oven runkoa juuri lainkaan eikä se voi kantaa kuin pienen osan oveen kohdistuvasta kuormituksesta.

Ottaen huomioon joustavat kiinnitysmenetelmät, uuden oven rungon täytyy kantaa lähes kaikki kuormitukset verrattuna nykyiseen oveen, jossa on lasi kiinnitettynä. Tästä johtuen uuden profiilin poikkileikkaus täytyy suunnitella mahdollisimman jäykäksi. Siksi uusi profiili on painavampi kuin nykyinen alumiiniprofiili. Tärkein asia on kuitenkin

kin ovilehden kokonaismassa. Taulukossa 21 on esitetty ovilehtien kokonaismassat yhdessä lasin ja polykarbonaatin kanssa.

**Taulukko 21.** Ovilehtien kokonaismassat lasin ja polykarbonaatin kanssa.

Ovi	Lasin/Polykarbonaattilevyn massa (kg)	Kokonaismassa (kg)
Sisäänpäin kääntyvä ovi	12,0 (lasi)	18,7
Alumiininen suorakaideprofiili	5,9 (polykarbonaatti)	14,9

Taulukosta nähdään, että uuden ovilehden kokonaismassa jää noin 20 % pienemmäksi kuin nykyisen ovilehden. Lisäksi uuden suorakaideprofiilin muotoa on mahdollista optimoida ja saada näin ollen ovilehden painoa laskettua edelleen. Kaksinkertaista lasia käytettäessä painonsäästö on polykarbonaattia käytettäessä enemmän verrattuna yksilasisiin kokonaisuuksiin. Painonsäästö kokonaisuudessaan on todella huomattava, vaikka alumiinirungon paino on nykyistä suurempi.

Vaatimuslistan perusteella voidaan todeta, että uudella profiililla ovilehti toteuttaa tärkeimmät vaatimukset eli:

- kevyempi kuin nykyinen ovi
- ei hitsauksia
- oven maksimipaksuus 40 mm
- E-hyväksytty
- helppo valmistettavuus
- sileä ulkopinta

Ainoa oleellinen vaatimus mihin ei tässä vaiheessa päästä on, että uusi ovilehti olisi yhtä jäykkä kuin nykyinen ovi lasin kanssa. Tämä täytyy selvittää testaamalla ja vertaamalla nykyisen oven tuloksia uuteen oveen. Lisäksi tarkemmassa vertailussa täytyy ottaa huomioon myös polykarbonaatin kiinnitys.

Ovirungon kokoonpanon eräs ratkaistavissa oleva asia liittyy hitsiliitosten korvaamiseen ruuviliitoksiin. Uudessa suorakaideprofiilissa on ruuvitaskut nopeampaa kiinnittämistä varten. Ovilehden käyttöympäristöstä johtuen oveen kohdistuu tärinää, joten ruuviliitosten väsymiskestävyyttä tulee testata ja verrata hitsiliitosten väsymiskestävyyteen. Ovilehden painon ja jäykkyyden suhteen voidaan sanoa, että paras rakenne on uudessa ovilehdessä, missä on käytetty alumiinista suorakaideprofiilia varustettuna ruuvitaskuilla. Kun lasi korvataan polykarbonaatilla, vaatimukset oven rungon jäykkyyteen kasvavat, joten uusi alumiininen suorakaideprofiili on parempi kuin nykyinen profiili. Näin ollen valitaan se rungon profiiliksi uuteen ovirakenteeseen.

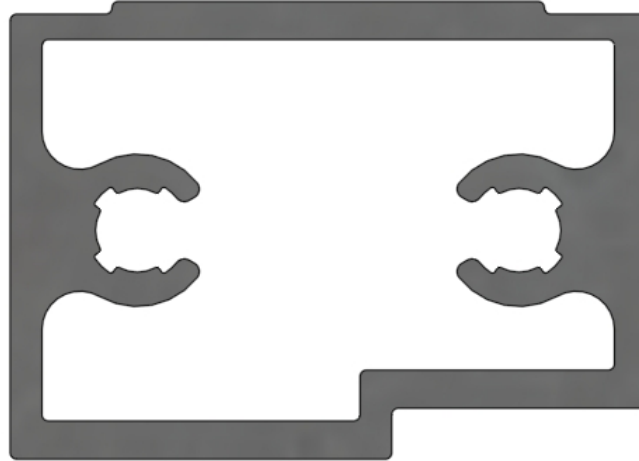
## 8. EHDOTUS UUDEKSI OVIRAKENTEEKSI

Tässä luvussa esitellään suositus uudeksi ovirakenteeksi, millä voidaan korvata nykyinen sisäänpäin kääntyvä ovilehti. Tässä diplomityössä huomioidaan ainoastaan kaksilevyinen ovirakenne. Oven runko kootaan uusista alumiinisista suorakaideprofiileista. PC-elementti kiinnitetään mekaanisesti runkoon käyttämällä PVC-vaahtoa kahden polykarbonaattilevyn välissä (Foiltek 2012). Profiilit asennetaan elementin reunoille levyjen väliin ja kiinnitetään toisiinsa ruuviliitoksien. Kumitiivisteet kiinnitetään liimateipin avulla alumiinirungon reunoille. Toimilaitteet ja muut lisävarusteet kiinnitetään ruuviliitoksien alumiinirunkoon. Kuvassa 35 on esitetty ehdotus uudeksi ovirakenteeksi.



**Kuva 35.** Uusi ovirakenne.

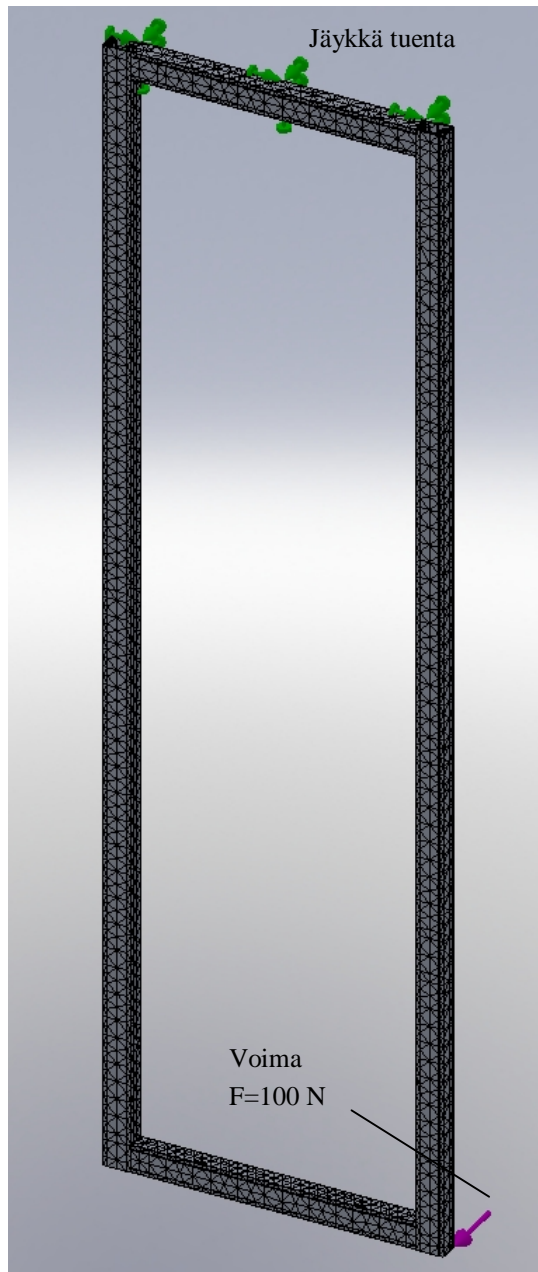
Alumiiniprofiilin rakennetta optimoidaan, jotta voidaan säästää painossa edelleen. Alumiinirungon profiilit kehitellään kiinnitettäväksi ruuviliitoksin ja FEM-laskennan avulla testataan, ettei ovi menetä rakenteellista jäykkyyttä profiilin optimoinnista johtuen. Kuvassa 36 on esitetty optimoitu profiili.



**Kuva 36.** Optimoitu suositusprofiili.

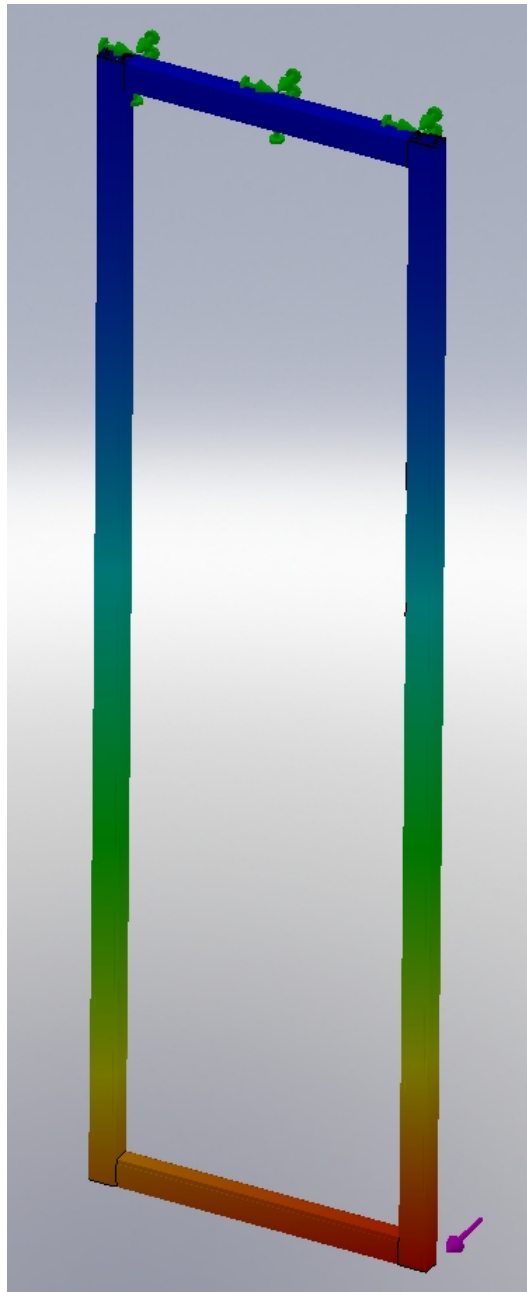
Profiilin ulkoreunaan on kehitelty kevennysurat, jotta rungon massaa voidaan pienentää. Edellä alumiinisen suorakaideprofiilin seinävahvuus on ollut 3 mm. Optimoidussa profiilissa lyhyemmän reunan seinämävahvuutta on pienennetty ja se on 2,5 mm. Näin saadaan edelleen laskettua rungon massaa. FEM-laskenta suoritetaan rungolle uusilla optimoiduilla profiileilla, jotta varmistetaan, ettei oven rakenteellista jäykkyyttä menetetä liikaa. Laskennan reunaehdot on esitetty kuvassa 37.





**Kuva 37.** FEM-laskennan reunaehdot optimoidulle profiilille

Reunaehdot laskentaan ovat samat mitä aikaisemmin. Oven yläreunassa on jäykkä tuenta, joka ilmaistaan vihreillä nuolilla. Kuormituskohta on oven alareunassa ja sen osoittaa violetti nuoli. Kuormituksen arvo on 100 N. Laskennassa on käytetty tiheää elementtiverkkoa kiinteistä elementeistä. FEM-laskennan tulos on esitetty kuvassa 38.



**Kuva 38.** FEM-laskennan tulos optimoidulle profiilille

Kuvassa muodonmuutos on kuvattu luonnollisessa koossaan suhteessa oven mittoihin. FEM-laskennan avulla saatu taipuman arvo optimoidulle profiilille on

$$v_{FEM} \approx 31,9 \text{ mm.}$$

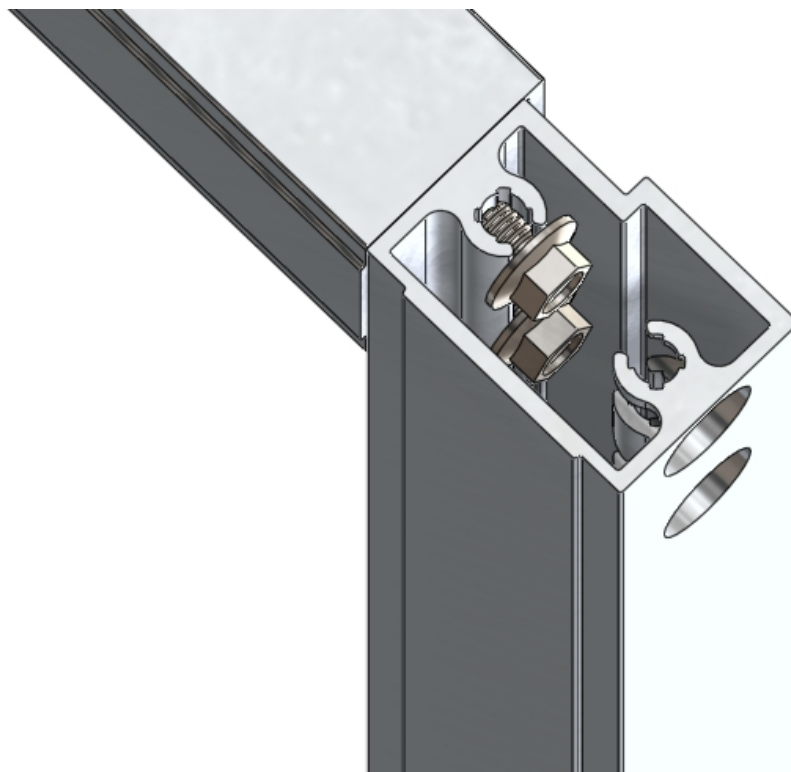
Nykyisen oven, suorakaideprofiilin ja optimoidun profiilin FEM-laskennan taipumat ja rungon massat on esitetty taulukossa 22.

**Taulukko 22.** Nykyisen profiilin ja uusien suorakaideprofiilien ominaisuudet.

Ovi	Rungon massa (kg)	$v_{FEM}$ (mm)
Sisäänpäin kääntyvä ovi	6,7	38,6
Alumiininen suorakaideprofiili	9,0	29,3
Optimoitu profiili	8,3	31,5

Kuten taulukosta voidaan huomata, jäykkyyden menetys on hyvin vähäinen verrattuna painon säästöön optimoidulla profiililla. Optimointia voi tehdä lisää, mutta tämän diplomityön puitteissa jatketaan tällä optimoidulla profiililla.

Seuraavaksi kehitellään tarkemmin ruuviliitoksen kiinnittäminen ja rungon reunoihin vaadittavat poraukset ja muut esivalmistelut. Profiilit kiinnitetään kierteen muovaavalla ruuvilla, joten kierteen koneistamista ei tarvita. Poraukset tehdään profiilin sisäpintaan sopivaksi ruuville. Ulkopintaan porataan isompi reikä, jotta kiinnitystyökalulla voidaan kiristää ruuvi tiukasti kiinni. Ruuviliitos on esitetty kuvassa 39.

**Kuva 39.** Ruuviliitos toteutettuna kierteen muovaavilla ruuveilla.

Liitoksessa on huomioitava se, että ulkoreunaan tulee riittävän suuret porausreiät, jotta ruuvien kiristämiseen tarvittava työkalu mahtuu profiilin sisälle. Kierteen muovaavat ruuvit ovat helpompi ja nopeampi tapa saada liitos tehtyä verrattuna normaaleihin ruuveihin. Ruuvitaskua mitoitettaessa on otettava huomioon kierreosan pituus ja vaatimus esireiän halkaisijasta kierteen muovaavalle ruuville. (Würth 2011)

Materiaalitekniikan diplomityössä on tutkittu, että kaksilevyiseen ovirakenteeseen soveltuu parhaiten PVC-vaaho polykarbonaattilevyjen välissä. Vaaho on lujaa painonsa nähden ja sitä voi taivuttaa kaareviin muotoihin helposti. Se kestää hyvin väsyttävää kuormitusta ja sillä on hyvä lämmöneristyskyky. (Foiltek 2012) Vaahdosta leikataan sopivan levyiset ja korkuiset palat karmiksi levyjen väliin ja liimataan ne levyihin kiinni Plexus-liimalla (Plexus 2011). Ennen liimausta polykarbonaatin kovapinnoite tulee poistaa (Muovimuotoilu 2012). Yksi vaihtoehto kiinnittämiseen on polykarbonaatista tehty hunajakkenno. Sillä saadaan lämpölaajeneminen huomioitua saman materiaalin ansiosta. Ongelmana on kuitenkin liimattavan pinnan vähyys, joten vaaho on tähän tarkoitukseen parempi vaihtoehto.

## 8.1 Prototyyppiovi

Tässä diplomityössä tehtiin uuden ovirakennesuosituksen perusteella prototyyppiovi, mikä koottiin tilaajayrityksen tuotannossa. Prototyyppi koottiin sisäänpäin kääntyvän oven korvaajaksi, mikä on leveämpi kuin edellä esitetty ehdotus uudeksi ovirakenteeksi ja siinä on kaareva muoto. Prototyyppiä varten ei saatu uusia profiileita varustettuina ruuvitaskuin, joten siinä käytettiin nykyisistä profiileista jäykempää profiilia. Ala- ja yläprofiilien sisään hitsattiin putkea, jonka avulla simuloitiin ruuvitaskua ja ruuvikiinnitystä. Kuvassa 40 on esitetty ruuviliitos normaalien M8 kuusiokoloruuvien avulla.



**Kuva 40.** Prototyyppioven ruuvikiinnitys.

Tässä prototyyppioivessa on kaareva muoto, joten levyelementti koottiin kaarevan muotin päällä. Muottina käytettiin uutta kaarevaa alumiinirunkoa, johon sisempi levy puristettiin kiinni, jotta levyelementtiin saatiin kaareva muoto. Tämän jälkeen vaahdosta leikatut palat liimattiin levyyn kiinni. Lopuksi ulompi levy liimattiin kiinni elementtiin. Kokoamisen jälkeen levyelementissä oli kaareva muoto. Alumiiniprofiilit asennettiin levyjen väliin ja kiinnitettiin toisiinsa kiinni ruuviliitoksien. Profiileihin tehtiin sopivat poraukset ja leikkaukset toimilaiteliitäntöjä varten ja ovi asennettiin testilaitteeseen, missä voitiin testata oven toimivuutta aukeamisen ja sulkemisen aikana. Kuvassa 41 on esitetty prototyyppiovi kiinnitettynä testilaitteeseen.



**Kuva 41.** Prototyyppiovi kiinnitettynä testilaitteeseen.

Testissä huomattiin että oven kokoaminen on mahdollista tällä tavoin, mutta se vaatii erityistä huolellisuutta liimaamisen suhteen, koska Plexus-liimalla työskentelyaika on 4-5 min (Plexus 2011). Liimasauman siisteys on myös ongelma, koska levyjen välillä olevaan tyhjään tilaan ei pääse siistimään saumaa. Tämä on mahdollista selvittää oikean muotoisen kuivauslistan avulla, joka peittää liimasauman siististi. Ruuviliitoksen kiinnittäminen oli nopeaa ja helppoa. Lopputuloksena oli jäykkä ja kestävä liitos.

Prototyyppiovi ei kuitenkaan ole aivan valmis tuote vaan sitä tulee kehittää edelleen. Liimausmenetelmää ja sen siisteyttä tulee kehittää, jotta saadaan virhemahdollisuudet poistettua ja luotua virheetön ulkonäkö. Ruuviliitoksen väsymiskestävyyttä tulee tarkastella enemmän todellisten ruuvitaskujen ja kierteen muovaavien ruuvien kanssa. Sitä tulee verrata hitsiliitoksen kestävyys ja sen pohjalta on mahdollista päättää onko ruuviliitos hyvä hitsiliitoksen korvaaja.

## 9. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä kehitettiin uudentyyppinen ovirakenne, jossa lasin tilalla käytetään polykarbonaattia. Tavoitteena oli lisäksi poistaa alumiinirungon hitsaukset, koska alumiinin hitsaaminen ja hiominen vievät paljon aikaa. Tavoitteeseen päästiin muotoilemalla alumiiniprofiiliin ruuvitasku, jonka avulla profiilien kiinnittäminen on nopeampaa kuin hitsiliitoksen. Polykarbonaatin kiinnittämisessä tuli ottaa huomioon sen lämpölaajeneminen, joten lasiin verrattuna samanlainen liimausmenetelmä ei ole kannattava. Uudessa ovirakenteessa käytetään PVC-vaahtoa liimattuna kahden polykarbonaattilevyn väliin. Alumiiniprofiilit asennetaan levyjen väliin ja kiinnitetään toisiinsa ruuviliitoksien. Uuden oven kokoaminen on nopeampaa ja se on kevyempi kuin nykyinen ovi.

Työssä testattiin nykyisiä ovirakenteita ja selvitettiin vaatimuksia uuden ovirakenteen jäykkyydelle. Vaatimukset uudelle ovirakenteelle saatiin nykyisen ovirakenteen lisäksi yrityksen asettamista ehdoista. Kolmelle olemassa olevalle ovimallille suoritettiin kolmipistetaivutuskoe, jonka avulla saatiin vaatimus uuden ovirakenteen sallitulle taipumalle. Mittauksissa huomattiin, että lasi on merkittävä jäykiste oven rungolle. Polykarbonaatti ei ole niin jäykkä materiaali kuin lasi. Tästä johtuen uuden rungon tulee kestää lähes kaikki siihen kohdistuvat kuormitukset.

Jatkokehittelyn pohjaksi valittiin yksi testatuista ovimalleista. Valinta tehtiin sen perusteella, minkä pohjalta kehittäminen oli helpointa aloittaa. Heikoin ja yksinkertaisin rakenne oli sisäänpäin kääntyvässä ovelle, joten tämä valittiin uuden ovirakenteen pohjaksi. Uuden oven kehitysprosessissa sovellettiin Pahlin ja Beitzin menetelmää, minkä avulla on hyvä arvioida erilaisia toteutustapoja uudelle ovirakenteelle. Uudeksi ovirakenteeksi kehitettiin kolme erilaista ratkaisumuunnelmaa, joiden profiilit mitoitettiin sallitun taipuman avulla käyttäen lujuusopin palkkikaavoja. Ovirakenteille suoritettiin pistearviointi, sillä sen perusteella on hyvä arvioida ratkaisumuunnelmien toimivuutta verrattuna vaatimuksiin. Pistearvioinnin perusteella nähtiin, mikä on paras vaihtoehto uudeksi ovirakenteeksi. Tulosta voidaan käyttää hyväksi uuden ovirakenteen valinnassa.

Uusia ovirakenteita verrattiin nykyiseen oveen FEM-laskennan avulla, missä simuloitiin kriittisintä tilannetta oven käyttöä ajatellen eli oven aukeamista alareunasta. FEM-laskennan tarkoituksena oli simuloida ovirakenteiden kiertojäykkyyttä, mikä on oven monimutkaisen rakenteen vuoksi hankalaa laskea lujuusopin avulla. FEM-laskennan tulosten perusteella huomattiin, että vain yksi uusista ovirakenteista täyttää sille asetetut vaatimukset ja on parempi kuin nykyinen ovirakenne.

Pistearvioinnin ja FEM-laskennan perusteella paras rakenne on ratkaisumuunnelmassa, jossa on alumiininen suorakaideprofiili ruuvitaskuilla varustettuna. Vaikka jokainen profiili mitoitettiin sallitun taipuman mukaan, tulee lujuusopin palkkikaavojen

käytössä huomioida se, että niiden perusteella ovirakenteiden mitoittaminen onnistuu vain suuntaa antavasti. Siksi FEM-laskenta on hyvä tarkastusmenetelmä, jos todellisten rakenteiden testaaminen on mahdotonta.

Diplomityön loppuvaiheessa kehittelyn perusteella tehtiin prototyypiovi. Ruuviliitoksia käyttämällä uuden oven kokoonpanoon käytettävä aika pieneni huomattavasti verrattuna nykyiseen oveen. Polykarbonaattilevyt kiinnitettiin toisiinsa käyttämällä niiden välissä PVC-vaahtoa, mikä liimattiin levyihin kiinni. Alumiiniprofiilit asennettiin levyjen väliin ja kiinnitettiin toisiinsa ruuviliitoksia. Toimilaitteet ja muut lisävarusteet kiinnitettiin alumiinirunkoon myös ruuviliitoksia. Prototyypiovi kuvasi hyvin suunnitelmia. Tämän perusteella voidaan todeta, että lasin korvaaminen polykarbonaatilla ja hitsiliitosten korvaaminen ruuviliitoksilla on mahdollista.

Diplomityö pääsi hyvin tavoitteisiinsa ja työn tuloksia voidaan käyttää pohjana oven viimeistelyssä uudeksi tuotteeksi. Ovirakenteiden väsyminen on kuitenkin edelleen oleellinen asia, mitä tulee tutkia tarkemmin ruuviliitosten osalta. Oven käyttöolosuhteista johtuen oveen kohdistuu runsaasti tärinää ja väsyttävää kuormitusta. Ruuviliitoksen väsymiskestävyyttä tuleekin testata, jotta sitä voidaan verrata hitsiliitoksen väsymiskestävyyteen. Ruuvikiinnitys on siis mahdollinen, mutta se vaatii lähempää tarkastelua. Testien pohjalta voidaan tehdä johtopäätökset siitä, onko ruuviliitoksen toteuttaminen järkevää, kun väsymisen ottaa huomioon.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että ovien painoa on mahdollista pienentää huomattavasti verrattuna nykyisiin oviin, kun lasi korvataan polykarbonaatilla. Kiinnittämismenetelmä vaatii kuitenkin viimeistelyä, jotta kokonaisuus saataisiin yhtä kestäväksi ja siistiksi kuin nykyisellä ovella. Myös tuotannon läpimenoaikaa on mahdollista pienentää verrattuna nykyisiin ovirakenteisiin, kun hitsiliitokset korvataan ruuviliitoksilla. Sillä ehdolla, että väsymisen kannalta ruuviliitokset saadaan kestävämmiksi kuin hitsiliitokset.



## LÄHTEET

Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M., Välimaa, V. 1997. Koneenosien suunnittelu. 2. Painos. Porvoo, WSOY. 796 s.

Airila, M., Karjalainen, J., Mantovaara, U., Nurmi, L., Ranta, A., Verho, A. 1985. Koneenosien suunnittelu 2. Porvoo, WSOY. 482 s.

Foiltek Oy. PVC-/vaahto-PVC-levyt [WWW] [Viitattu 3.1.2012] Saatavilla: <http://www.foiltek.fi/tuotteet/muovilevyt-ja-kalvot/pvc-vaahto-pvc-levyt>

Hautero, J. 2010. Linja-auton oven testausjärjestelmän esisuunnittelu. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Konstruktiotekniikka. 90 s.

ITW Plexus. Plexus Products [WWW] [Viitattu 20.12.2011] Saatavilla: <http://www.itwplexus.co.uk/plexus/plexus-products>

Kinos, T., Hyypiä, T., Ahola, E. 1998. Alumiini rakennemateriaalina, Osa 2: Alumiini-tuotteiden valmistus. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 154 s.

Muovimuotoilu [WWW] [Viitattu 3.1.2012] Saatavilla: <http://www.muovimuotoilu.fi/>

Nykänen, S. 2009. Tampereen teknillinen yliopisto. Polykarbonaatti (PC). Saatavilla: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PC\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PC_FI.pdf)

Outinen, H., Salmi, T. 2004. Lujuusopin perusteet. Tampere, Pressus Oy. 464 s.

Pahl, G., Beitz, W. 1992. Koneensuunnitteluoppi (Suomentanut Uolevi Konttinen). 2. Painos. Helsinki, Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto, MET. 608 s.

Salmi, T. 2000. Teknillisen mekaniikan perusteet. Tampere, Pressus 414 s.

Sika Finland [WWW] [Viitattu 3.1.2012] Saatavilla: <http://fin.sika.com/fi/group.html>

SolidWorks 2010 Help [WWW] [Viitattu 4.1.2012] Saatavilla:  
<http://help.solidworks.com/2010/English/SolidWorks/sldworks/LegacyHelp/Sldworks/Overview/StartPage.htm>

Vink Finland Oy. PC - Polykarbonaatti [WWW] [Viitattu 17.11.2011] Saatavilla:  
<http://www.tuotteet.vink.fi/tuotteet/pc-polykarbonaatti.html#materiaali=PC%20-%20polykarbonaatti>

Würth Oy. Kiinnitystarviketaulukot [WWW] [Viitattu 29.11.2011] Saatavilla:  
[http://www.wurth.fi/site/fi/home/taulukot\\_/taulukko/kiinnitystarvike\\_1/taulukot\\_kiinnitys\\_1.html](http://www.wurth.fi/site/fi/home/taulukot_/taulukko/kiinnitystarvike_1/taulukot_kiinnitys_1.html)

Würth Oy. Kiinnitystarvikkeet [WWW] [Viitattu 29.11.2011] Saatavilla:  
[http://www.wurth.fi/site/fi/home/tuotteet\\_/tuoteryhmat\\_/kiinnitystarvikkeet\\_/kiinnitystarvikkeet\\_1.html](http://www.wurth.fi/site/fi/home/tuotteet_/tuoteryhmat_/kiinnitystarvikkeet_/kiinnitystarvikkeet_1.html)